



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**“DIAGNÓSTICO DE MOTORES DIÉSEL A BASE DEL ANÁLISIS
DE ACEITE USADO”**



AUTOR: Paredes Vinueza Oscar Adres

DIRECTOR: Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco, MSc

Ibarra, 2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO | | | |
|----------------------|------------------------------|-----------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 1003926936 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | Paredes Vinueza Oscar Andres | | |
| DIRECCIÓN: | Ibarra | | |
| EMAIL: | oaparedesv@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO: | | TELÉFONO MÓVIL: | 0997703107 |

| DATOS DE LA OBRA | |
|-----------------------------|--|
| TÍTULO: | Diagnóstico de motores diésel a base del análisis de aceite usado. |
| AUTOR (ES): | Paredes Vinueza Oscar Andres |
| FECHA: DD/MM/AAAA | 07/03/2024 |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | |
| PROGRAMA: | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | Ingeniero Automotriz |
| ASESOR /DIRECTOR: | Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco |

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 7 días del mes de marzo de 2024

EL AUTOR:

Nombre: Paredes Vinueza Oscar Andres

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 7 de marzo de 2024

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) 

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco

C.C.: 0401447826

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular "Diagnóstico de motores diésel a base del análisis de aceite usado" elaborado por Paredes Vinueza Oscar Andres, previo a la obtención del título del Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f): 

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco

C.C.: 0401447826

(f): 

Ing. Melo Obando Jorge Luis

C.C.: 1718346529

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis amados padres, Sandra y Ramiro, quienes con su inquebrantable apoyo y sabios consejos han sido mi guía y ejemplo de superación en la vida y en este viaje académico.

A mis queridas hermanas, Joha y Gaby, por su constante aliento y comprensión.

A mi amada Lily, cuya paciencia y amor han sido mi inspiración diaria para no darme por vencido y culminar una etapa más de mi vida.

A mi preciosa hija, Lina, que ilumina y motiva cada uno de mis días con su alegría.

Este logro no sería posible sin el amor y respaldo incondicional de cada uno de ustedes. Con gratitud eterna, dedico este trabajo de titulación a mi familia, fuente inagotable de fuerza y motivación.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios y a la vida, que, a pesar de los desafíos, me permitieron culminar con éxito este trabajo de titulación.

A mis padres, Sandra y Ramiro, así como a mis hermanas, Joha y Gaby, les agradezco enormemente por su apoyo incondicional a lo largo de mi trayectoria académica. Cada uno de ellos ha realizado sacrificios significativos para allanar el camino hacia la consecución de esta meta.

De manera especial, mi gratitud se extiende a mi compañera de vida, Lily. En los momentos más críticos, siempre estuvo presente, brindándome ánimo y apoyo incondicional para superar los obstáculos. Gracias por ser un pilar fundamental en mi vida y en la de nuestra preciada hija.

Asimismo, quiero agradecer a la empresa "Lubrisa" y al Ingeniero Pablo Caicedo por facilitar el desarrollo de este trabajo, proporcionando recursos y oportunidades para llevar a cabo este estudio. Su respaldo ha sido esencial para el éxito de este proyecto.

Reconozco la invaluable orientación y dedicación de mi tutor, el Ingeniero Carlos Mafla, cuyos consejos y guía fueron cruciales en cada etapa de este proceso.

Este logro no habría sido posible sin el apoyo de cada una de estas personas y entidades. Mi más sincero agradecimiento por ser parte fundamental de este importante capítulo en mi vida académica.

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto de titulación aborda un análisis del aceite usado de dos motores de autobuses de servicio interprovincial, con un recorrido del motor de 998 000 km y otro con 148 000 km. El propósito principal es determinar la contaminación y desgaste del lubricante en base a las condiciones a las que están expuestos estos motores y evaluar la influencia que la geografía puede tener en su funcionamiento. Para la obtención de las muestras de aceite, es imperativo que los motores estén en condiciones óptimas de funcionamiento. Se utiliza un kit de extracción que consta de una bomba de vacío, una sonda y un recipiente para almacenar el aceite usado. Cada muestra se etiqueta detalladamente, indicando el grado de aceite utilizado por cada motor, el kilometraje acumulado y el tiempo de funcionamiento del aceite en el motor. Con base en los resultados obtenidos, se lleva a cabo una comparación del estado final tanto del aceite como de los motores. Esto permite determinar el grado de contaminación del aceite y llegar a la conclusión de que la vida útil de los aceites estudiados podría prolongarse, ya que no muestran alteraciones significativas en sus componentes. Una vez analizado los resultados obtenidos, en cuanto a los motores, se observa un mayor desgaste en el motor que posee 148 000 kilómetros, lo que lleva a la conclusión de que este desgaste se produce debido a las exigencias geográficas del recorrido del autobús y al prolongado intervalo entre los mantenimientos preventivos.

Palabras clave: Contaminación de lubricantes, desgaste de motores, aceite lubricante, motor diésel.

ABSTRACT

This degree project addresses an analysis of the used oil from two interprovincial bus engines, one engine with 998 000 km and another with 148 000 km. The main purpose is to determine the contamination and wear of the lubricant based on the conditions to which these engines are exposed and to evaluate the influence that geography can have on their operation. For the collection of oil samples, it is imperative that the engines are in optimal operating conditions. An extraction kit consisting of a vacuum pump, a probe, and a container to store the used oil is used. Each sample is labeled in detail, indicating the grade of oil used by each engine, the accumulated mileage, and the operating time of the oil in the engine. Based on the results obtained, a comparison of the final state of both the oil and the engines is carried out. This allows determining the degree of oil contamination and concluding that the useful life of the studied oils could be extended, as they do not show significant alterations in their components.

Once the results obtained have been analyzed, regarding the engines, greater wear is observed in the engine that has 148 000 kilometers, which leads to the conclusion that this wear is produced due to the geographical demands of the bus route and the prolonged interval between preventive maintenance.

Keywords: Lubricants contamination, engines wear, lubricating oil, diesel engine.

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--|---|
| MEC. Motor de Encendido por Compresión. | NH₃. Amoníaco. |
| MCI. Motor de Combustión Interna. | SAE. Sociedad de Ingenieros Automotores. |
| MC. Mantenimiento basado en la condición. | API. Instituto Americano del Petróleo. |
| OCM. Monitoreo de la condición de aceite. | TAN. Número total de ácidos. |
| MP. Mantenimiento preventivo | TBN. Número total de bases. |
| PMS. Punto muerto superior. | PPM. Partículas por millón. |
| PMI. Punto muerto inferior | Si. Silicio. |
| VI. Índice de viscosidad. | Na. Sodio. |
| SO₂. Dióxido de azufre. | V. Vanadio. |
| CO. Monóxido de carbono. | Ni. Níquel. |
| NO_x. Óxido de nitrógeno. | Fe. Hierro. |
| O₃. Ozono. | Cr. Cromo. |
| CO₂. Dióxido de carbono. | Al. Aluminio. |
| HC. Hidrocarburos. | Cu. Cobre. |
| PM. Material particulado. | Pb. Plomo. |

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---------------------------------|------|
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| RESUMEN EJECUTIVO | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE SIGLAS | viii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiv |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Problema de investigación..... | 1 |
| Justificación | 1 |
| Objetivo general..... | 1 |
| Objetivos específicos | 2 |
| CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 1.1 Motor diésel..... | 3 |
| 1.1.1 Elementos móviles..... | 3 |
| 1.1.1.1 Pistón..... | 4 |
| 1.1.1.2 Aros de pistón..... | 4 |
| 1.1.1.3 Biela..... | 5 |
| 1.1.1.4 Cigüeñal | 5 |
| 1.1.1.5 Árbol de levas..... | 6 |
| 1.1.1.6 Válvulas | 6 |
| 1.1.2 Ciclo diésel | 7 |
| 1.1.3 Combustión diésel..... | 9 |
| 1.1.3.1 Combustión | 9 |
| 1.1.3.2 Combustible | 9 |
| 1.1.3.3 Emisiones | 10 |
| 1.1.4 Daños comunes..... | 10 |
| 1.2 Aceite motor diésel..... | 12 |
| 1.2.1 Tipos de aceite | 12 |
| 1.2.1.1 Clasificación sae..... | 12 |
| 1.2.1.2 Clasificación api | 13 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 1.2.2 | Aditivos | 15 |
| 1.2.3 | Propiedades del aceite | 15 |
| 1.2.4 | Contaminación del aceite | 16 |
| 1.3 | Análisis del aceite | 17 |
| 1.3.1 | Técnicas para determinar el desgaste y contaminación del aceite..... | 18 |
| 1.3.1.1 | Viscosidad cinemática | 18 |
| 1.3.1.2 | Presencia de agua..... | 18 |
| 1.3.1.3 | Número de acidez total (TAN)..... | 18 |
| 1.3.1.4 | Presencia de combustible | 19 |
| 1.3.1.5 | Número de base total (tbn)..... | 19 |
| 1.3.1.6 | Presencia de anticongelante | 19 |
| 1.3.1.7 | Análisis infrarrojo..... | 19 |
| 1.3.1.8 | Análisis espectrométrico | 20 |
| 1.4 | Tipos de mantenimiento..... | 21 |
| 1.4.1 | Mantenimiento predictivo o mantenimiento basado en la condición (CM) 21 | |
| 1.4.2 | Mantenimiento correctivo | 22 |
| 1.4.3 | Mantenimiento preventivo | 22 |
| CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS | | 23 |
| 2.1 | Materiales | 23 |
| 2.1.1 | Motores..... | 23 |
| 2.1.1.1 | Rutas que cubren los autobuses..... | 24 |
| 2.1.2 | Kit de extracción de aceite | 25 |
| 2.1.3 | Equipos para análisis..... | 26 |
| 2.2 | Métodos..... | 26 |
| 2.2.1 | Identificación de muestras..... | 26 |
| 2.2.2 | Propiedades de los aceites analizados. | 27 |
| 2.2.3 | Contaminantes del aceite..... | 27 |
| 2.2.4 | Degradación del aceite | 28 |
| 2.2.4.1 | Oxidación..... | 28 |
| 2.2.4.2 | Nitración..... | 29 |
| 2.2.4.3 | Sulfatación..... | 29 |
| 2.2.5 | Normas que rigen las pruebas de análisis de aceite. | 29 |

| | | |
|--|--|----|
| 2.2.5.1 | Astm D2896 – Método de ensayo estándar para número de base en productos de petróleo por valoración potenciométrica con ácido perclórico. | 29 |
| 2.2.5.2 | Astm D6595 - Método de ensayo estándar para la determinación de metales de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes usados y fluidos hidráulicos usados por espectrometría de emisión atómica con electrodo de disco rotatorio..... | 29 |
| 2.2.5.3 | Astm D445 - Método de ensayo estándar para viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad dinámica)..... | 29 |
| 2.2.5.4 | Astm E2412 - Método de ensayo estándar para monitoreo de condición del lubricante en servicio por Análisis de tendencia mediante espectrometría infrarroja transformada de Fourier (ft-ir). | 30 |
| 2.2.6 | Metodología general | 30 |
| 2.2.6.1 | Materiales para la toma de muestra..... | 31 |
| 2.2.6.2 | Motores para la investigación. | 31 |
| 2.2.6.3 | Extraer el aceite usado para el análisis. | 31 |
| 2.2.6.4 | Almacenamiento del aceite. | 32 |
| 2.2.6.5 | Análisis de resultados | 33 |
| 2.2.7 | Metodología de extracción del aceite..... | 33 |
| 2.2.7.1 | Esterilización kit de extracción de aceite | 34 |
| 2.2.7.2 | Motores en condiciones para toma de muestras..... | 34 |
| 2.2.7.3 | Ensamblar kit de extracción de aceite. | 34 |
| 2.2.7.4 | Retirar la bayoneta de nivel de aceite de los motores..... | 35 |
| 2.2.7.5 | Introducir la sonda para extraer el aceite | 35 |
| 2.2.7.6 | Extracción de aceite..... | 36 |
| 2.2.7.7 | Almacenar muestra de aceite | 36 |
| 2.2.8 | Análisis del Aceite. | 37 |
| 2.2.8.1 | Enviar muestras de aceite..... | 38 |
| 2.2.8.2 | Recibir resultados y evaluar la contaminación y/o desgaste del aceite | 38 |
| 2.2.8.3 | Realizar el análisis de resultados..... | 38 |
| CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. | | 41 |
| 3.1 | Análisis para el motor de 148 000 kilómetros..... | 41 |
| 3.1.1 | Degradación del lubricante..... | 42 |
| 3.2 | Análisis para el motor de 998 000 kilómetros..... | 43 |
| 3.2.1 | Degradación del lubricante..... | 44 |

| | | |
|--|---|----|
| 3.3 | comparación del estado de los aceites. | 44 |
| 3.4 | Comparación del desgaste del aceite y del motor entre los dos autobuses. | 45 |
| 3.4.1 | Comparación de la contaminación de los lubricantes..... | 45 |
| 3.4.2 | Comparación de desgaste de los motores..... | 49 |
| CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. | | 55 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 58 |
| ANEXOS..... | | 64 |
| Anexo 1: Fichas técnicas de aceites..... | | 64 |
| Anexo 2: Tablas de resultados de los análisis de aceites. | | 64 |
| Anexo 3: Fotografías tomadas durante la recolección de muestras..... | | 66 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Materiales comunes usados en la fabricación de elementos de un MCI [5].</i> | 3 |
| Tabla 2 <i>Tipos de desgaste en elementos de un MCI [30].</i> | 11 |
| Tabla 3 <i>Clasificación de viscosidad SAE para aceites monogrado [35].</i> | 12 |
| Tabla 4 <i>Clasificación de viscosidad SAE para aceites multigrado [35].</i> | 13 |
| Tabla 5 <i>Clasificación API de aceites lubricantes para motores MEC [35].</i> | 14 |
| Tabla 6 <i>Elementos contaminantes más comunes del aceite lubricante [29].</i> | 17 |
| Tabla 7 <i>Especificaciones técnicas del autobús de la cooperativa Flota Imbabura [50].</i> | 24 |
| Tabla 8 <i>Especificaciones técnicas del autobús de la cooperativa Transportes Ecuador [50].</i> | 24 |
| Tabla 9 <i>Rutas que cubre el autobús de Transportes Ecuador.</i> | 25 |
| Tabla 10 <i>Rutas más largas que cubre el autobús de Flota Imbabura.</i> | 25 |
| Tabla 11 <i>Equipos empleados para realizar el análisis del aceite.</i> | 26 |
| Tabla 12 <i>Especificaciones técnicas del aceite usado en el motor con 148 000 kilómetros.</i> | 27 |
| Tabla 13 <i>Especificaciones técnicas del aceite usado en el motor con 998 000 kilómetros.</i> | 27 |
| Tabla 14 <i>Elementos contaminantes metálicos [29], [43], [52], [54].</i> | 28 |
| Tabla 15 <i>Elementos contaminantes no metálicos [29], [43], [52], [54].</i> | 28 |
| Tabla 16 <i>Resumen de las normas ASTM y sus respectivas mediciones.</i> | 30 |
| Tabla 17 <i>Rango de valores a tener en cuenta para el análisis de resultados.</i> | 39 |
| Tabla 18 <i>Valores límites de elementos contaminantes [55].</i> | 39 |
| Tabla 19 <i>Valores a tomar en cuenta para el análisis de la viscosidad y el TBN en los aceites usados.</i> | 40 |
| Tabla 20 <i>Resultados obtenidos del análisis del aceite del motor con 148 000 kilómetros.</i> | 41 |
| Tabla 21 <i>Comparación de valores del aceite nuevo vs el aceite usado del motor con 148 000 km.</i> | 42 |
| Tabla 22 <i>Resultados obtenidos del análisis del aceite del motor con 998 000 kilómetros.</i> | 43 |
| Tabla 23 <i>Comparación de valores del aceite nuevo vs el aceite usado del motor con 998 000 km.</i> | 44 |
| Tabla 24 <i>Resumen de la cantidad de partículas presentes en cada lubricante.</i> | 53 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Elementos móviles de un motor de combustión interna (MCI) | 3 |
| Figura 2 Daños térmicos en el pistón. | 4 |
| Figura 3 Nombres y posiciones de los aros de pistón..... | 5 |
| Figura 4 Ilustración de una biela de un MCI..... | 5 |
| Figura 5 Cigüeñal de un MCI..... | 6 |
| Figura 6 Ilustración de un árbol de levas realizada en CAD..... | 6 |
| Figura 7 Válvulas de un MCI..... | 7 |
| Figura 8 Ciclo de un motor de cuatro tiempos. | 7 |
| Figura 9 Diagrama P-V del ciclo Carnot..... | 8 |
| Figura 10 Diagrama P-V. Ciclo Carnot vs Ciclo Diésel ideal..... | 8 |
| Figura 11 Densidades de energías volumétricas de varios combustibles..... | 9 |
| Figura 12 Clasificación API para motores diésel según el desarrollo tecnológico de motores y lubricantes..... | 14 |
| Figura 13 Materiales y equipos utilizados para medir la viscosidad..... | 18 |
| Figura 14 Valorador de la marca Mettler Toledo..... | 19 |
| Figura 15 Equipo Eraspac oil, para determinar degradación del aceite..... | 20 |
| Figura 16 Equipo Spectroil para determinar elementos metálicos presentes en el aceite..... | 20 |
| Figura 17 Técnicas de detección para mantenimiento predictivo..... | 21 |
| Figura 18 Buses interprovinciales utilizados para el estudio, con sus respectivos kilometrajes..... | 23 |
| Figura 19 (a)Motor del autobús Flota Imbabura. (b)Motor del autobús Transportes Ecuador..... | 24 |
| Figura 20 Kit de extracción de aceite..... | 25 |
| Figura 21 Etiqueta para identificación de la muestra..... | 26 |
| Figura 22 Flujograma de la metodología para realizar un correcto análisis de aceite usado..... | 30 |
| Figura 23 Lugares donde se realizó la extracción del aceite..... | 32 |
| Figura 24 Almacenamiento de la muestra de aceite dentro de una bolsa tipo ziplock, . | 32 |
| Figura 25 Flujograma para la extracción del aceite..... | 33 |
| Figura 26 Elementos del kit de extracción esterilizados, (a) bomba de vacío, (b) sonda, (c) envases de almacenamiento..... | 34 |
| Figura 27 (a) Motor limpio y en condiciones para la extracción de aceite, (b) Tablero indicando kilometraje recorrido necesario para realizar el cambio de aceite y la temperatura adecuada de funcionamiento..... | 34 |
| Figura 28 Kit ensamblado para extraer aceite..... | 35 |
| Figura 29 Retirar bayoneta de nivel de aceite del motor..... | 35 |
| Figura 30 Sonda para extraer aceite..... | 35 |
| Figura 31 Proceso de extracción de aceite..... | 36 |
| Figura 32 (a)Muestra de aceite debidamente almacenada y etiquetada. (b)Modelo de etiquetado para identificar la muestra..... | 36 |
| Figura 33 Flujograma para realizar el análisis de aceite..... | 37 |
| Figura 34 Muestras de aceite etiquetadas y embaladas para envío..... | 38 |
| Figura 35 Resultados recibidos por parte de la empresa “Lubrisa”..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 36 <i>Estado de los aceites empleados en este estudio.</i> | 44 |
| Figura 37 <i>Partículas de silicio presentes en los lubricantes.</i> | 46 |
| Figura 38 <i>Partículas de sodio presentes en los lubricantes.</i> | 47 |
| Figura 39 <i>Partículas de vanadio presentes en los lubricantes.</i> | 47 |
| Figura 40 <i>Partículas de níquel presentes en los lubricantes.</i> | 48 |
| Figura 41 <i>Diagnóstico del aceite de los motores por parte de la empresa "Lubrisa".</i> .. | 48 |
| Figura 42 <i>Partículas de hierro presentes en los lubricantes.</i> | 49 |
| Figura 43 <i>Partículas de cromo presentes en los lubricantes.</i> | 50 |
| Figura 44 <i>Partículas de aluminio presentes en los lubricantes.</i> | 51 |
| Figura 45 <i>Partículas de cobre presentes en los lubricantes.</i> | 51 |
| Figura 46 <i>Partículas de plomo presentes en los lubricantes.</i> | 52 |
| Figura 47 <i>Partículas de estaño presentes en los lubricantes.</i> | 53 |

INTRODUCCIÓN

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El análisis del estado de los motores diésel a base del aceite usado se basa en la interpretación de los resultados de las propiedades fisicoquímicas del lubricante.

El aceite después de cierto kilometraje pierde sus propiedades de lubricación lo cual es normal debido a los esfuerzos que está siendo sometido en el interior del motor, pero, hay que analizar si este desgaste es el adecuado o si las propiedades cambiaron drásticamente; además, se debe considerar si en el lubricante, existe presencia de impurezas como limallas que pueden aparecer por el desgaste de los elementos del motor, presencia de agua o combustible que puede deberse a alguna fuga por mala hermeticidad, entre otros.

Para ello se debe examinar si los resultados obtenidos del análisis del aceite están dentro de los rangos permitidos de impurezas o desgaste, caso contrario hay que determinar que componentes de motor pueden estar fallando.

Este proyecto se basa en el análisis del aceite lubricante usado en motores diésel, realizar una investigación acerca de los materiales que lo componen, sus propiedades, durabilidad y su influencia en el funcionamiento de los motores. Seguidamente, se realizará el análisis del aceite lubricante de dos motores diésel semejantes de buses interprovinciales, un motor usado superando los 750 000 km y el otro seminuevo, con un kilometraje inferior a los 200 000 km, para después de obtener los resultados de las pruebas realizadas al aceite de cada motor, analizarlos y ver en que condición se encuentran, las fallas que tienen o las posibles fallas que puedan presentarse. Con este análisis lo que se pretende es prevenir grandes averías en los motores, evitando así gastos innecesarios a sus propietarios y paralización por causa de reparaciones en estos medios de transporte.

JUSTIFICACIÓN

Al ser el aceite una parte fundamental en la lubricación de motores diésel, este recoge información valiosa acerca del desgaste de piezas internas o fugas que pueden presentarse en los motores, es por ello la importancia de realizar un análisis de este lubricante para saber con mayor certeza los posibles problemas que puedan presentarse y de esta manera buscar soluciones o prevenir más averías.

OBJETIVO GENERAL

Conocer y analizar el estado del aceite una vez acabada su vida útil, para realizar un correcto diagnóstico de motores diésel, con la finalidad de detectar las posibles fallas y/o desgaste de piezas o elementos del motor, prolongando de esta manera su vida útil y previniendo grandes daños los cuales conllevan a reparaciones costosas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una investigación bibliográfica de los materiales usados en aceites y partes móviles y fijas del motor.
2. Determinar tipos de motores a diésel a utilizar.
3. Evaluar el estado final del aceite, identificando sus impurezas y reconocer que pieza o elemento la causa.
4. Categorizar el estado de los motores diésel estudiados acorde a los resultados obtenidos en: bueno, malo o crítico.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 MOTOR DIÉSEL

El motor diésel o motor de encendido por compresión (MEC), cuyo desarrollo se remonta a más de un siglo, se ha consolidado como una fuente de conversión de energía mecánica de notable eficiencia. [1]. Estos motores gozan de una alta demanda en una variedad de aplicaciones, tales como camiones, barcos, locomotoras y vehículos todoterreno, que incluyen minicargadoras, montacargas y maquinaria de construcción. Esto se debe a sus bajos costos operativos, su destacada eficiencia en la conversión de combustible y su notable durabilidad [2].

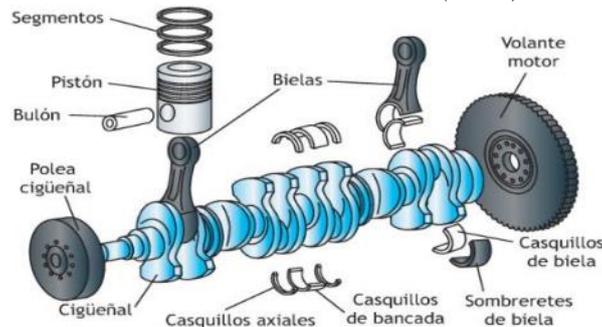
Los MEC se destacan por su alta relación de compresión, que aumenta la temperatura del aire en el cilindro. El diésel se enciende espontáneamente debido a la alta temperatura, lo que mejora la eficiencia. Sin embargo, esto requiere motores más resistentes y pesados para soportar la presión. Aunque son más eficientes, los MEC tienden a consumir más combustible y producir mayores emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas que los motores de gasolina. Algunos MEC incorporan turbocompresores o sobrealimentadores para mejorar aún más la eficiencia al aumentar el suministro de aire para la combustión [3].

1.1.1 ELEMENTOS MÓVILES

Los elementos en constante movimiento dentro del motor desempeñan un papel crucial en la transferencia de la energía mecánica producida durante la combustión. Dentro de estos, destacan especialmente las partes que conforman el tren alternativo, tal como se ilustra en la **Figura 1** [4].

Figura 1

Elementos móviles de un motor de combustión interna (MCI)



Tomado de: C. J. Fernández Pilataxi and R. L. Meneses Huera [4].

Tabla 1

Materiales comunes usados en la fabricación de elementos de un MCI [5].

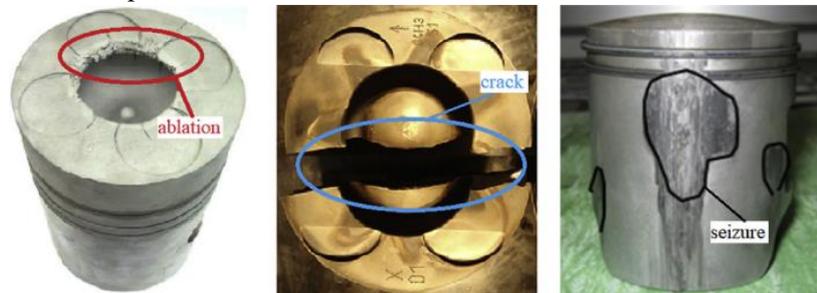
| Componentes cruciales del motor | Materiales de uso común |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| Pistón | Hierro fundido, aleación de aluminio |
| Anillo de pistón | Hierro fundido, acero |
| Camisa de cilindro | Hierro fundido, aleación de aluminio |
| La válvula de admisión/escape | Acero, aleación de titanio |
| Asientos de válvulas | Acero inoxidable, aleación de cobre |
| Casquillo del cigüeñal | Bronce, metal babbitt |

1.1.1.1 PISTÓN

El pistón, un componente crítico en motores, experimenta velocidades de hasta 25 m/s y enfrenta condiciones extremas de temperatura y presión en el cilindro, con temperaturas de hasta 2200 °C y presiones de 13-20 MPa. La transferencia de calor inadecuada en el pistón resulta en daños térmicos como ablación, grietas y agarrotamiento (**Figura 2**), comprometiendo la estabilidad del motor. Por lo tanto, los materiales de los pistones deben cumplir requisitos específicos, como bajo peso, resistencia mecánica en un amplio rango de temperaturas, bajo coeficiente de expansión lineal, resistencia al desgaste, alta conductividad térmica a temperaturas elevadas y facilidad de mecanizado [6], [7]. Estos materiales suelen ser de baja densidad y están compuestos por diversas aleaciones de aluminio, magnesio y silicio, los cuales tienen una mayor capacidad de disipación del calor [4].

Figura 2

Daños térmicos en el pistón.



Tomado de: Z. Yao, K. Hu, and R. Li [6].

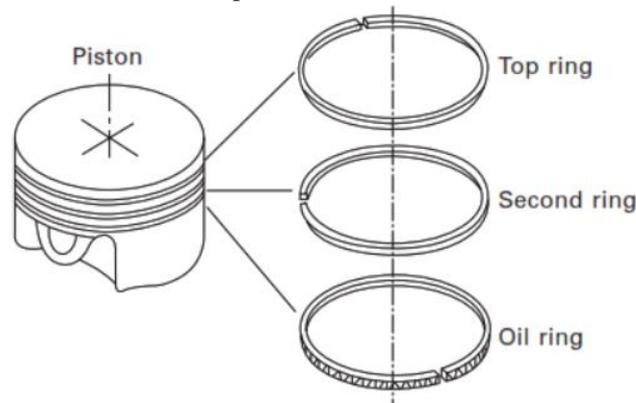
1.1.1.2 AROS DE PISTÓN

En sus inicios, la función primordial de los anillos de pistón era evitar la fuga de gases desde la cámara de combustión hacia el espacio entre el pistón y la pared en dirección al cárter. La modificación introducida por Mille en 1862 revolucionó este componente al permitir que la presión del vapor actuara en la parte posterior del anillo, mejorando notablemente su capacidad de sellado y posibilitando la utilización de anillos más flexibles diseñados para adaptarse a la expansión térmica. La eficacia del sellado depende de factores como la conformabilidad del anillo y del revestimiento, la tensión radial y la distribución de la fuerza del gas en las caras del anillo. Este avance en el diseño de los anillos de pistón marcó un hito en la ingeniería, potenciando la eficiencia y el rendimiento de los motores al optimizar la función esencial de sellado en condiciones de elevada presión y temperatura en la cámara de combustión. Estos anillos, agrupados en el "paquete de aros", suelen comprender hasta cinco anillos, con al menos un anillo de compresión conocido como "anillo superior". La cantidad exacta de anillos varía según el tipo de motor, generalmente oscilando entre 2 y 4 anillos de compresión y de 0 a 3 anillos de control de aceite, o simplemente un anillo de aceite. En motores diésel de cuatro tiempos de alta velocidad, por ejemplo, se suelen emplear dos o tres anillos de compresión y un solo anillo de control de aceite, específico para motores diésel [8], [9].

Estos componentes se elaboran mediante hierro fundido, con pequeñas proporciones de otro material que varían según el fabricante del motor y el tipo específico de segmento que se esté considerando [4].

Figura 3

Nombres y posiciones de los aros de pistón.



Tomado de: V. D'Agostino and A. Senatore [8].

1.1.1.3 BIELA

La biela, como un elemento crucial en los MCI, desempeña una función fundamental al transmitir las fuerzas desde el pistón hasta el cigüeñal. En los MEC modernos, caracterizados por altos valores de par a bajas velocidades de rotación, se generan tensiones elevadas en pistones, cigüeñales, bielas y otros elementos del motor. La conexión entre el pistón y el cigüeñal se logra mediante la biela, que presenta secciones con cojinetes en ambos extremos, identificados como el extremo pequeño (lado del pistón) y el extremo grande (lado del cigüeñal). Sometida a fuerzas considerables durante el desplazamiento del pistón en el cilindro, la biela experimenta flexión, tensión y compresión en su eje. Su diseño, comúnmente adoptando la forma de una viga I, ofrece una alta relación rigidez-peso. Durante la carrera de escape, la biela soporta una carga de tracción considerable, al tiempo que enfrenta una carga compresiva durante la carrera de combustión [10], [11].

Figura 4

Ilustración de una biela de un MCI



Tomado de: L. Witek and P. Zelek [10].

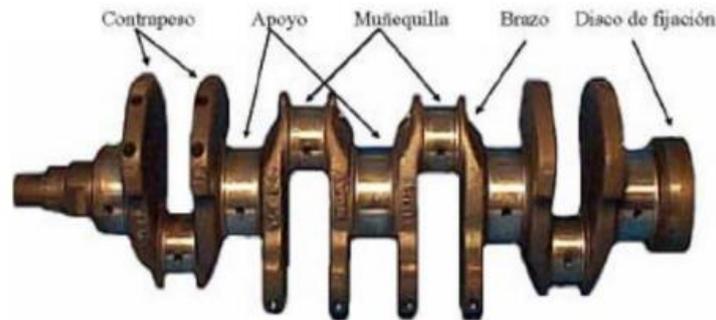
1.1.1.4 CIGÜEÑAL

El cigüeñal, un componente de considerable tamaño en el motor, presenta una geometría compleja diseñada para transformar el movimiento alternativo del pistón, transmitido a través de una biela, en un movimiento rotativo. Este componente consta de tres elementos principales: los muñones principales, las muñequillas y las redes del cigüeñal, todos fabricados típicamente con acero forjado y hierro fundido, o también con aleaciones de

cromo-níquel y cromo-vanadio. Las fallas más comunes en los cigüeñales de motores de combustión interna están asociadas a fatigas originadas por cargas de flexión y torsión [12], [13].

Figura 5

Cigüeñal de un MCI



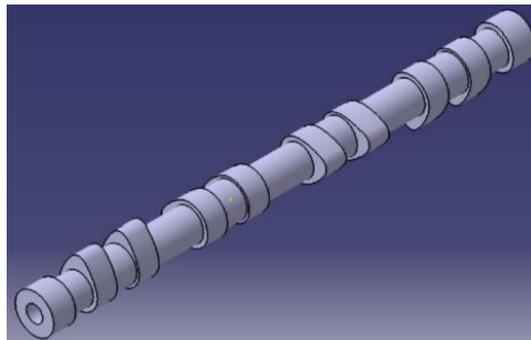
Tomado de: C. J. Fernández Pilataxi and R. L. Meneses Huera [4].

1.1.1.5 ÁRBOL DE LEVAS

El árbol de levas en los motores de combustión interna cumple una función esencial como mecanismo de sincronización, regulando la apertura, cierre y superposición de válvulas durante la carrera de escape. Formado por muñones que giran sobre cojinetes, se conecta al cigüeñal mediante engranajes, correa o cadena de distribución. Su estructura delgada presenta múltiples asientos de cojinete y se vincula con elementos como engranajes de sincronización y el sistema de tren de válvulas. Durante la operación, rota impulsado por el cigüeñal, y las levas activan las válvulas según un orden y sincronización previamente establecidos [14], [15].

Figura 6

Ilustración de un árbol de levas realizada en CAD.



Tomado de: A. Patra et al [15].

1.1.1.6 VÁLVULAS

Las válvulas de admisión y escape en los MCI regulan la carga de mezcla fresca y la expulsión de gases de combustión, respectivamente. Estas válvulas enfrentan condiciones desafiantes, ya que deben resistir una atmósfera corrosiva a temperaturas muy elevadas, especialmente la válvula de escape, además de soportar cargas mecánicas variables a lo largo del tiempo [16].

Figura 7

Válvulas de un MCI.



Tomado de: C. J. Fernández Pilataxi and R. L. Meneses Huera [4].

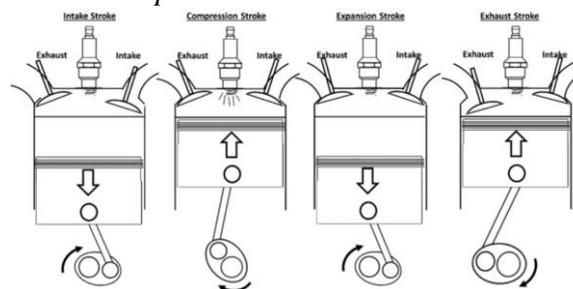
1.1.2 CICLO DIÉSEL

El ciclo diésel es un proceso termodinámico aplicado en MCI que alcanzan la ignición mediante la compresión. Este ciclo se rige por una serie de procesos que permiten que el motor regrese al mismo estado al final de cada ciclo [17].

En un MEC, el aire experimenta una compresión durante la fase de compresión después de la admisión de aire puro o de una combinación de aire y gases de escape recirculados. Luego, se inyecta combustible directamente en el cilindro, mezclándose con el aire comprimido y los gases residuales presentes en la cámara para alcanzar la inflamabilidad adecuada. La ignición del combustible tiene lugar tras un cierto retardo de tiempo. Posteriormente, parte del combustible se quema en una modalidad de combustión premezclada, mientras que el resto se quema por difusión. Los MEC, que pueden operar con relaciones de compresión más altas, ofrecen eficiencias superiores, aproximadamente del 45%. La gestión de la carga en estos motores se consigue al ajustar la cantidad de combustible inyectado, restringida por la presencia de oxígeno en el aire de admisión. Los motores diésel queman el combustible en una región localmente rica en relación estequiométrica, pero globalmente empobrecida en aire, lo cual contribuye a mejorar la eficiencia.[18].

Figura 8

Ciclo de un motor de cuatro tiempos.

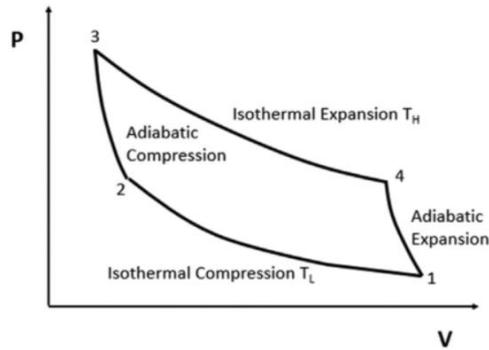


Tomado de: J. E. Johnson and J. D. Naber [18].

Los motores en aplicaciones prácticas suelen incurrir en pérdidas, pero la comparación con el ciclo ideal de Carnot (representado en la **Figura 9**) resulta beneficiosa para analizar y comprender estas pérdidas en un motor específico. La mayoría de los motores utilizados en aplicaciones de servicio pesado siguen un ciclo Diesel, que se representa en términos generales mediante un gráfico en color amarillo, como se muestra en la **Figura 10** [19].

Figura 9

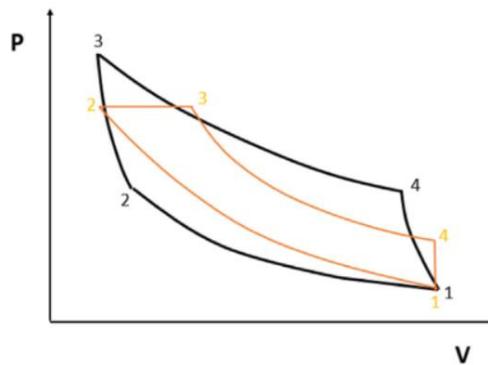
Diagrama P-V del ciclo Carnot



Tomado de: A. Tolley [19].

Figura 10

Diagrama P-V. Ciclo Carnot vs Ciclo Diésel ideal.



Tomado de: A. Tolley [19].

En un ciclo termodinámico se toma en consideración ciertas transformaciones termodinámicas ideales, como [20]:

- i. Isobárica: Proceso a presión constante.
- ii. Isocórica: Proceso a volumen constante.
- iii. Isotérmica: Proceso a temperatura constante.
- iv. Adiabática: Proceso sin flujo de calor y sin rozamiento interno.

A continuación, se explican los procesos que ocurren en el ciclo termodinámico ideal, mostrado en la **Figura 10**.

- Proceso 1-2: Implica una compresión isentrópica que ocurre después de la admisión de aire en el cilindro [17].
- Proceso 2-3: Se añade calor a presión constante. Para la primera carrera de potencia, es crucial inyectar combustible cuando el pistón se encuentra en el PMS [17].

- Proceso 3-4: Involucra una expansión isentrópica. El pistón se mueve hacia el PMI debido a la expansión de los gases, y en este proceso tiene lugar la conversión de energía química en energía mecánica [17].
- Proceso 4-1: Se produce una liberación de calor a volumen constante. Los gases de la combustión se expulsan cuando el pistón vuelve al PMS [17].

1.1.3 COMBUSTIÓN DIÉSEL

1.1.3.1 COMBUSTIÓN

La combustión en la cámara de un motor es un proceso altamente complejo que involucra reacciones termoquímicas y una dinámica de fluidos turbulenta. Esta complejidad impacta significativamente la combustión del combustible y la formación de contaminantes. La turbulencia durante la combustión es beneficiosa para la propagación de la llama y la completa combustión en la carrera de potencia. Aspectos como la mezcla aire-combustible, la atomización, la vaporización y la propagación de la llama en el cilindro tienen un profundo efecto en el desempeño del motor, las emisiones y la calidad de la combustión [21].

El proceso de combustión es un proceso termodinámico que involucra tres elementos clave: tiempo, temperatura y turbulencia, además de un cuarto elemento, contenido de oxígeno. Un diseño y operación efectivos de la combustión requieren la correcta configuración de estos cuatro parámetros, de los cuales, el tiempo, la temperatura y el contenido de oxígeno son fácilmente definibles y cuantificables, lo que facilita su cálculo, estimación y medición. Sin embargo, la turbulencia o la mezcla no es un parámetro que se pueda definir y cuantificar con la misma facilidad. De hecho, el control de la turbulencia es todo un arte, y evaluar, definir, cuantificar y controlar la mezcla son tareas desafiantes. Desde un punto de vista, la turbulencia es un parámetro altamente influenciado por factores de configuración, mecánicos y controlados por el flujo. El diseño y la disposición física, que incluyen la ubicación de los chorros de gas, puntos de entrada, puntos de mezcla, geometría, flujos, entre otros, tienen un impacto significativo en la calidad de la mezcla del proceso [22].

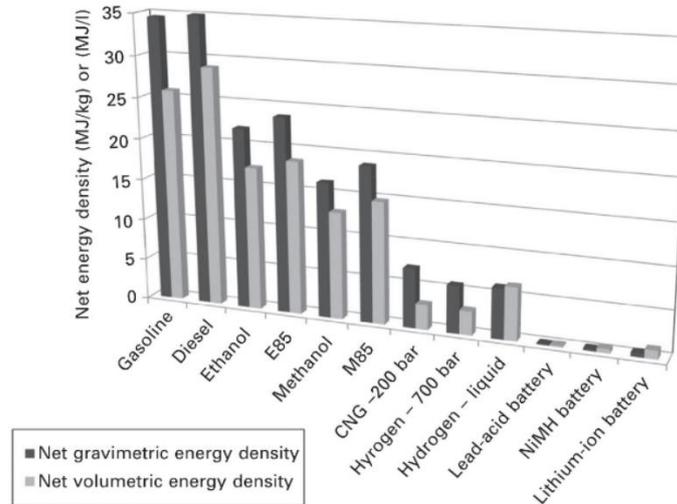
1.1.3.2 COMBUSTIBLE

El término "combustible" se refiere a sustancias a base de carbono, ya sean sólidas, líquidas o gaseosas, que se queman para liberar energía en forma de calor. Ejemplos comunes incluyen carbón, madera, fueloil, diésel, gasolina, queroseno y gas natural. Estos combustibles se almacenan a bordo de vehículos y máquinas móviles para satisfacer sus necesidades energéticas, determinando su autonomía. Sin embargo, la creciente demanda de combustibles, en parte impulsada por el aumento de vehículos, se encuentra frente a la disminución progresiva de las reservas de petróleo [19], [23], [24].

En el diésel, la calidad se evalúa mediante el número de cetano, que mide el retardo de ignición. Un menor retardo de encendido, es decir, un tiempo corto entre la inyección y la ignición, favorece el funcionamiento óptimo del motor, y el diésel tiene un punto de inflamación que varía entre 38°C y 71°C (100°F-160°F) [25].

Figura 11

Densidades de energías volumétricas de varios combustibles.



Tomado de: J. W. G. Turner and F. C. P. Leach [26].

1.1.3.3 EMISIONES

Los motores de combustión, así como la abrasión de neumáticos o frenos, generan una variedad de emisiones contaminantes al aire, tales como: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos y partículas en suspensión de diferentes tamaños [27].

- Dióxido de carbono (CO₂): Principal producto de la combustión. No se considera un contaminante, sino, como un gas de efecto invernadero [28].
- Hidrocarburos (HC): Se producen de una combustión incompleta, contribuyen a la formación de ozono, el cual irrita los ojos, daña los pulmones, agravando los problemas respiratorios [28].
- Monóxido de carbono (CO): Se origina cuando el carbono se oxida parcialmente. Es altamente tóxico, incoloro e inodoro [28].
- Material particulado (PM): De este producto de la combustión, una parte va directamente a la atmósfera, mientras que otra parte se forma en la atmósfera después de la liberación de gases, como: dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH₃) y compuestos orgánicos volátiles [28].
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Se forman de la reacción del nitrógeno presente en el aire con el oxígeno. Además, contribuyen a la formación de PM [28].

1.1.4 DAÑOS COMUNES

El deterioro de las partes internas del motor se presenta de diversas maneras y suele estar vinculado con la reducción de la película de lubricación. Los distintos tipos de desgaste pueden incluir:

- *Desgaste adhesivo*: Este fenómeno se produce en ausencia de una película lubricante que sirva como barrera entre las superficies móviles. Cuando estas superficies entran en contacto directo, se genera una considerable cantidad de calor, lo que provoca deformaciones superficiales y un aumento en la zona de contacto, lo cual se conoce como proceso de asentamiento o rodaje. Además, hay

la posibilidad de que el deterioro del mecanismo se acelere, lo que podría resultar en un evento denominado gripado [29].

- *Desgaste fatiga superficial*: Este tipo de desgaste se observa en los rodamientos como resultado de la repetición cíclica de esfuerzos a los que están expuestos, provocando la formación de fisuras y marcas superficiales [29].
- *Desgaste corrosivo*: Ocurre cuando el aceite experimenta un grado avanzado de degradación, generando compuestos corrosivos que pueden dañar las piezas del motor [29].
- *Desgaste abrasivo*: se produce cuando partículas de un material extremadamente duro o rugoso se desprenden y entran en contacto con superficies más suaves. La abrasión puede manifestarse cuando partículas extrañas se insertan entre dos superficies más suaves. [29].
- *Desgaste erosivo*: Este tipo de desgaste ocurre cuando las superficies metálicas están expuestas a un flujo rápido de líquido que contiene partículas duras o sólidas. Esta acción puede provocar deformación y desprendimiento de material en las superficies metálicas afectadas [29].

Tabla 2

Tipos de desgaste en elementos de un MCI [30].

| Parte | Adhesivo | Corrosivo | Abrasivo | Fatiga | Erosivo |
|--------------------------------|----------|-----------|----------|--------|---------|
| Camisa, segmentos, pistones | X | X | X | | |
| Levas, empujadores, balancines | X | X | X | X | |
| Vástago - guía de válvulas | X | | X | | |
| Apoyo - asiento de válvulas | | | X | | |
| Engranajes de distribución | X | | X | X | |
| Muñones | | X | X | X | X |
| Cojinetes | | X | X | X | X |
| Bomba de aceite | X | | X | X | |

| | | | |
|----------------------|---|---|---|
| Bomba de combustible | X | X | X |
| Bomba de inyección | X | X | X |

1.2 ACEITE MOTOR DIÉSEL

Los aceites de motor son esenciales para el mantenimiento de motores de combustión interna, garantizando eficiencia y bajas emisiones a lo largo de su vida útil. Cada tipo de aceite se adapta a una aplicación específica y es capaz de proteger el motor en condiciones severas. Los lubricantes de motor cumplen tres funciones principales: preservar la durabilidad del motor, mejorar la eficiencia del combustible para reducir las emisiones de CO₂ y mantener bajos niveles de contaminantes durante toda la vida útil del vehículo, sin importar las condiciones de funcionamiento [31].

Según su composición, se distinguen aceites lubricantes en categorías de minerales o sintéticos, compuestos principalmente por hidrocarburos parafínicos, nafténicos y, en menor proporción, hidrocarburos aromáticos. A estos se les añaden diversos aditivos, que constituyen entre el 2% y el 25% de la composición total del aceite [32].

1.2.1 TIPOS DE ACEITE

Las clasificaciones se efectúan considerando dos aspectos fundamentales: viscosidad y condiciones de servicio. En lo que respecta a la viscosidad, la clasificación más relevante es la establecida por la SAE (Sociedad de Ingenieros Automotores). En cuanto a las condiciones de servicio, se rige por la normativa del API (Instituto Americano del Petróleo) [33].

1.2.1.1 CLASIFICACIÓN SAE

Este sistema clasifica los aceites lubricantes de acuerdo con su viscosidad a baja temperatura, lo cual es un indicador crucial para su capacidad de arranque en climas fríos. Los aceites que no llevan el sufijo "W" son denominados "aceites monogrado" porque cumplen exclusivamente con un grado SAE y están fabricados para operar en una temperatura específica o en un rango muy estrecho de temperaturas. En contraste, los aceites con el sufijo "W", que representa "Winter" (invierno en inglés), exhiben excelentes capacidades de arranque en frío y se formulan especialmente para climas donde la temperatura cae regularmente por debajo de cero grados centígrados [34].

Tabla 3

Clasificación de viscosidad SAE para aceites monogrado [35].

| Grado de viscosidad SAE | Viscosidad dinámica máxima a temperatura mínima (mPa*s a °C) | | Viscosidad cinemática a 100°C m ² /s | |
|-------------------------|--|--------------|---|-----|
| | Arranque | Bombeo | Mín | Máx |
| 0W | 6 200 a -35 | 60 000 a -40 | 3.8 * 10 ⁻⁶ | |
| 5W | 6 600 a -30 | 60 000 a -35 | 3.8 * 10 ⁻⁶ | |

| | | | | |
|-----|--------------|--------------|------------------|--------------------|
| 10W | 7 000 a -25 | 60 000 a -30 | $4.1 * 10^{-6}$ | |
| 15W | 7 000 a -20 | 60 000 a -25 | $5.6 * 10^{-6}$ | |
| 20W | 9 500 a -15 | 60 000 a -20 | $5.6 * 10^{-6}$ | |
| 25W | 13 000 a -10 | 60 000 a -15 | $9.3 * 10^{-6}$ | |
| 20 | | | $5.6 * 10^{-6}$ | $< 9.3 * 10^{-6}$ |
| 30 | | | $9.3 * 10^{-6}$ | $< 12.5 * 10^{-6}$ |
| 40 | | | $12.5 * 10^{-6}$ | $< 16.3 * 10^{-6}$ |
| 50 | | | $16.3 * 10^{-6}$ | $< 21.9 * 10^{-6}$ |
| 60 | | | $21.9 * 10^{-6}$ | $< 26.1 * 10^{-6}$ |

Tanto los aceites del motor como los de la transmisión están formulados de manera que minimizan la resistencia al inicio, es decir, su viscosidad es baja a bajas temperaturas. Estos aceites poseen un índice de viscosidad superior, el cual se logra mediante la adición de mejoradores de viscosidad, también conocidos como aditivos poliméricos, y se les denomina "aceites multigrado" [34].

Tabla 4

Clasificación de viscosidad SAE para aceites multigrado [35].

| Grado de viscosidad SAE | Viscosidad cinemática a 100°C m ² /s | |
|-------------------------|---|------------------|
| | Mín. | Máx. |
| 0W20 | $5.6 * 10^{-6}$ | $9.3 * 10^{-6}$ |
| 0W30 | $9.3 * 10^{-6}$ | $12.5 * 10^{-6}$ |
| 0W40 | $12.5 * 10^{-6}$ | $16.3 * 10^{-6}$ |
| 5W20 | $5.6 * 10^{-6}$ | $9.3 * 10^{-6}$ |
| 5W30 | $9.3 * 10^{-6}$ | $12.5 * 10^{-6}$ |
| 5W40 | $12.5 * 10^{-6}$ | $16.3 * 10^{-6}$ |
| 5W50 | $16.3 * 10^{-6}$ | $21.9 * 10^{-6}$ |
| 10W30 | $9.3 * 10^{-6}$ | $12.5 * 10^{-6}$ |
| 10W40 | $12.5 * 10^{-6}$ | $16.3 * 10^{-6}$ |
| 15W40 | $12.5 * 10^{-6}$ | $16.3 * 10^{-6}$ |
| 15W50 | $16.3 * 10^{-6}$ | $21.9 * 10^{-6}$ |
| 20W20 | $5.6 * 10^{-6}$ | $9.3 * 10^{-6}$ |
| 20W30 | $9.3 * 10^{-6}$ | $12.5 * 10^{-6}$ |
| 20W40 | $12.5 * 10^{-6}$ | $16.3 * 10^{-6}$ |
| 20W50 | $16.3 * 10^{-6}$ | $21.9 * 10^{-6}$ |
| 25W50 | $16.3 * 10^{-6}$ | $21.9 * 10^{-6}$ |
| 25W60 | $21.9 * 10^{-6}$ | $26.1 * 10^{-6}$ |

1.2.1.2 3CLASIFICACIÓN API

Sistema de clasificación basado en el nivel de calidad del producto, especialmente diseñado para aceites automotrices. La API los clasifica mediante dos letras. La primera (C) denota el tipo de motor, en este caso Diesel, y la segunda letra indica las condiciones en las que opera el motor [33].

Estas son las principales categorías de aceites empleados en motores diésel:

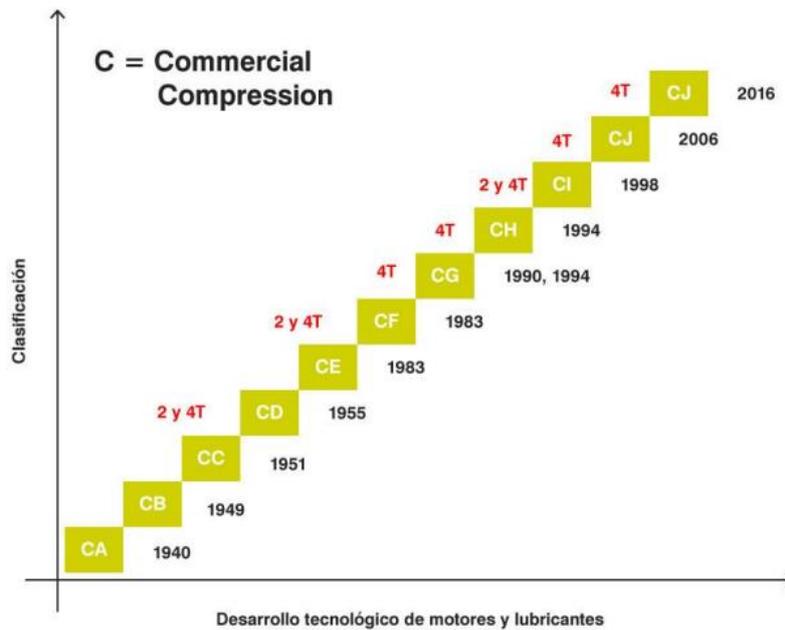
Tabla 5

Clasificación API de aceites lubricantes para motores MEC [35].

| CATEGORÍA | SERVICIO | ESTADO |
|------------------|--|---------------|
| CF | Se introdujo en el año de 1994. Destinados a motores todo terreno, de inyección indirecta y otros motores diésel incluyendo aquellos que utilizan combustible con contenido de azufre superior a 0.5% en peso. | Vigente |
| CF-4 | Se introdujo en el año de 1990. Destinados a motores de alta velocidad, de cuatro tiempos, de aspiración natural y turbocargados. | Vigente |
| CG-4 | Para motores que cumplen las normas de emisión de 1994. Destinados a motores de trabajo intenso, de alta velocidad, de cuatro tiempos que utilizan combustible con contenido de azufre menor de 0.5% en peso | Vigente |
| CH-4 | Para motores que cumplen con las normas de emisión de gases de escape de 1998. Destinados a motores de alta velocidad, de cuatro tiempos que utilizan combustible con contenido de azufre hasta de 0.5% en peso. | Vigente |
| CI-4 | Para motores que cumplen con las normas de emisión de gases de escape de 2004. Destinados a motores de alta velocidad, de cuatro tiempos que utilizan combustible con contenido de azufre hasta de 0.5% en peso. Algunos aceites CI-4 también pueden calificar para la designación CI-4 PLUS. | Vigente |
| CJ-4 | Para motores que cumplen con las normas de emisión de gases de escape de 2007. Destinados a motores de alta velocidad, de cuatro tiempos que utilizan combustible con contenido de azufre hasta de 0.05% en peso (500 mg/kg). Sin embargo, al utilizar aceite CJ-4 con combustible que contenga más de 15 mg/kg de azufre, consulte al fabricante del motor para el intervalo de servicio. | Vigente |

Figura 12

Clasificación API para motores diésel según el desarrollo tecnológico de motores y lubricantes.



Tomado de: J. D. Hernández Pedraza and Maldonado Rodríguez Andrés Felipe [34].

1.2.2 ADITIVOS

Los aditivos en los lubricantes juegan un papel esencial al reducir la fricción en motores, especialmente en condiciones de alta carga y temperatura, combatiendo problemas como desgaste, corrosión, formación de espuma y rozamiento en las partes móviles. Estos aditivos contienen compuestos orgánicos derivados del azufre, nitrógeno y metales, añadiéndose en cantidades mínimas para mejorar o proporcionar propiedades específicas al lubricante y, al mismo tiempo, suprimir o reducir aquellas que podrían ser perjudiciales. Se dividen principalmente en dos grupos: inhibidores, que retardan la degradación del aceite, y aditivos mejoradores, que optimizan cualidades físicas básicas del lubricante en diversas condiciones operativas [33], [36].

- *Inhibidores*: Diseñados para retrasar el deterioro del aceite, estos actúan como detergente-dispersantes, antioxidantes, anticorrosivos, agentes anti desgaste, agentes alcalinos y agentes anti emulsificadores [33].
- *Aditivos Mejoradores*: Contribuyen a mejorar las cualidades físicas básicas del aceite, afectando el índice de viscosidad, el poder antiespumante, el sellado, la oleosidad, la capacidad de extrema presión y la rigidez dieléctrica. Este enfoque busca optimizar el rendimiento y la resistencia del lubricante en diversas condiciones operativas [33].

1.2.3 PROPIEDADES DEL ACEITE

Las principales propiedades de las bases lubricantes incluyen las siguientes:

- *Viscosidad*: La propiedad más crucial del aceite lubricante es su viscosidad, ya que afecta la formación de películas lubricantes, la generación de calor y el enfriamiento de componentes como cilindros, engranajes y cojinetes. También influye en la capacidad del aceite para sellar y prevenir fugas, en la tasa de consumo de aceite y en la facilidad de arranque de maquinaria en condiciones de frío [37].

- *Índice de viscosidad (VI)*: Se refiere a la evaluación de cómo la viscosidad del aceite cambia en respuesta a las variaciones de temperatura. Cuanto mayor es el VI, menos se espesará un aceite al enfriarse y menos se adelgazará a temperaturas más elevadas, lo que proporciona un mejor rendimiento del lubricante en ambos extremos de temperatura. Esta característica es esencial para un buen rendimiento en aceites de motor multigrado [38].
- *Punto de inflamación*: Se define como la temperatura mínima a la que el aceite libera vapores capaces de generar inflamabilidad. Por lo general, se encuentra en un rango de 200 a 240 °C. Es importante destacar que este punto de inflamación puede elevarse debido a la degradación del lubricante, mientras que se reduce en presencia de combustible en el aceite [39].
- *Volatilidad*: Es una medida de la pérdida de aceite debida a la evaporación, y por lo general es menor en aceites de base con mayor viscosidad y un índice de viscosidad más alto [38].
- *Densidad*: es una medida de la relación entre la masa y el volumen del aceite [37].
- *Estabilidad térmica*: Cuando un lubricante se somete a temperaturas excesivas debido a su uso, es crucial evitar que esta elevada temperatura cause un deterioro severo del lubricante, lo que podría impedir que cumpla eficazmente su función de lubricación y, en casos extremos, llevar a su ignición y destrucción [39].
- *Número total de ácidos (TAN) y Número total de bases (TBN)*: El TAN se refiere a la concentración de ácidos orgánicos y mide la acidez total presente en el lubricante. Por otro lado, el TBN está vinculado con la capacidad del lubricante para contrarrestar los ácidos generados durante la combustión en los motores [37].
- *Punto de congelación*: Es la temperatura más baja a la que el aceite puede fluir de manera gravitatoria durante su enfriamiento. Normalmente, esta temperatura se expresa en incrementos de 3°C [30].
- *Resistencia a la oxidación*: Resistencia del lubricante a la formación de compuestos oxidados y a su reacción con el oxígeno [37].
- *Demulsibilidad*: Habilidad para separar y mantener en suspensión el agua que lo ha contaminado [37].
- *Detergencia*: Habilidad para eliminar las acumulaciones de carbón y lodo presentes en las superficies de los componentes móviles del motor y mantener dichos residuos en suspensión en el aceite [37].
- *Disolvencia*: Habilidad para disolver o descomponer partículas contaminantes presentes en el aceite [37].

1.2.4 CONTAMINACIÓN DEL ACEITE

Cuando el lubricante entra en contacto con las partes que necesitan lubricación, existe la posibilidad de que se mezcle con restos de aceite previamente utilizado, lo que podría resultar en una potencial contaminación. Además, las partículas metálicas o virutas de metal provenientes de las piezas son uno de los principales contribuyentes al deterioro del aceite, ya que aceleran su tasa de degradación. El deterioro puede manifestarse de manera química o física, y puede originarse tanto por factores internos inherentes al lubricante como por influencias externas. El deterioro físico, comúnmente denominado contaminación, se manifiesta mediante la introducción de sustancias extrañas en el lubricante, tales como agua, partículas de fundición, residuos de soldadura, virutas

metálicas, polvo y partículas generadas por desgaste abrasivo. Este proceso de degradación de los lubricantes impacta directamente en el rendimiento de diversos tipos de motores. En ausencia de medidas preventivas para evitar que este proceso cause deterioro en los componentes o en el motor en su conjunto, se podrían enfrentar costos sustanciales derivados de paradas no planificadas y, en casos extremos, daños severos [34], [40].

Tabla 6

Elementos contaminantes más comunes del aceite lubricante [29].

| Elemento | Fuente más común |
|-----------------|--|
| Hierro | Bloque motor, guía de válvulas, árbol de levas |
| Cobre | Cojinetes de biela y bancada |
| Plomo | Cojinetes |
| Níquel | Árbol de levas, cigüeñal |
| Plata | Rodamientos |
| Vanadio | Válvulas |
| Aluminio | Rodamientos, arena |
| Cromo | Anillos de pistón, válvulas |
| Cobre | Cojinetes, tubos intercambiadores de calor de aceite |
| Silicio | Líquido refrigerante |
| Sodio | Líquido refrigerante |
| Potasio | Líquido refrigerante |

1.3 ANÁLISIS DEL ACEITE

Es fundamental adquirir un profundo conocimiento de los componentes metálicos que conforman las diversas secciones de un motor. Esto permite llevar a cabo un análisis del aceite utilizado con el propósito de identificar los elementos que podrían sufrir un deterioro acelerado. A continuación, se enumeran los componentes clave [41]:

- *Hierro (Fe)*: Camisas de cilindros, engranajes, manivela, pasadores de biela, bomba de aceite, tren de válvulas, compresor de aire, seguidor de levas [41].
- *Cobre (Cu)*: Bujes o cojinetes, turboalimentador, regulador, bomba de aceite, pasador de biela, balancín, eje de rodillo de leva, compresor de aire, bomba de inyección de combustible, engranajes de sincronización o engranaje intermedio, bomba de agua, aditivos del aceite, entre otros [41].
- *Cromo (Cr)*: Cojinetes de rodillo/bolas, compresor de aire, anillos de pistón, válvulas de escape, cigüeñal [41].
- *Plomo (Pb)*: Revestimiento de cojinetes de bancada y de biela, revestimiento de cojinetes de árbol de levas, cojinetes del turboalimentador [41].
- *Molibdeno (Mo)*: Grasa con contenido de molibdeno [41].
- *Sílice (Si)*: Entrada de tierra, grasa con contenido de sílice, aditivo antiespumante.
- *Sodio (Na)*: Escape del enfriador, entrada de agua, condensación, aditivo del aceite [41].

1.3.1 TÉCNICAS PARA DETERMINAR EL DESGASTE Y CONTAMINACIÓN DEL ACEITE.

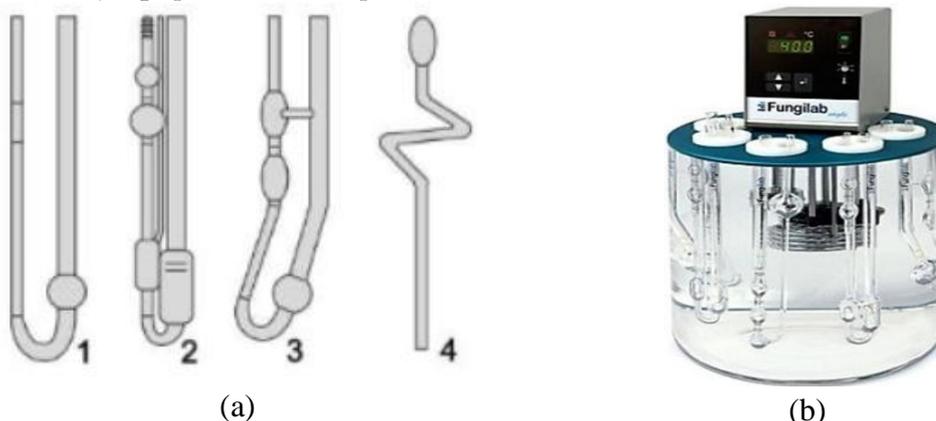
1.3.1.1 VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Diversos factores, tanto externos (como presión y temperatura) como internos (como la composición del aceite), pueden incidir en la viscosidad. Una mayor interacción molecular entre las moléculas del fluido suele asociarse con una mayor viscosidad, mientras que una menor interacción se relaciona con una menor viscosidad. Para medir la viscosidad, existen múltiples opciones, incluyendo viscosímetros de bolas, viscosímetros semiautomáticos y viscosímetros capilares y rotacionales [30].

Para llevar a cabo este análisis, es fundamental que el proceso de medición se realice en un entorno donde la temperatura esté bajo control constante. Una de las prácticas más comunes para garantizar una temperatura específica controlada y uniforme es mediante el uso de baños termostáticos. En estos baños, los viscosímetros capilares se sumergen para asegurar que la temperatura en todo el viscosímetro capilar sea precisa. Esto permite realizar mediciones de viscosidad, que normalmente se efectúan a temperaturas de 40°C y 100°C [29], [42].

Figura 13

Materiales y equipos utilizados para medir la viscosidad.



(a) Viscosímetros capilares

(b) Equipo usado para realizar el baño de viscosidad.

Tomado de: D. A. Betancourt Pineda and D. F. Flores Jaramillo y M. Moran Velásquez [29], [43].

1.3.1.2 PRESENCIA DE AGUA

La cuantificación aproximada de agua se lleva a cabo mediante la prueba de "chisporroteo". En este análisis, se deposita una gota de aceite sobre una superficie que ha sido previamente calentada a una temperatura que oscila entre 230°F y 250°F (110°C y 121°C). La formación de burbujas en la gota de aceite se interpreta como un indicio de la presencia de agua. Se considera que los niveles de agua son aceptables si se encuentran en el rango del 0.1% al 0.5%, siendo este último valor el límite máximo permitido [41].

1.3.1.3 NÚMERO DE ACIDEZ TOTAL (TAN)

La prueba, siguiendo la norma ASTM D974, consiste en llevar a cabo una titulación de una solución estándar que contiene la muestra, neutralizando el ácido mediante la adición

de una cantidad medida de KOH (hidróxido de potasio). Las soluciones indicadoras de cambio de color permiten determinar el nivel de acidez en mg/KOH/g. Mientras que la norma ASTM D664, se emplea cuando la opacidad del aceite impide la identificación del cambio de color mediante los indicadores mencionados previamente. El punto final se detecta a través de una modificación en la conductividad eléctrica. El aumento del TAN durante el servicio refleja el nivel de deterioro y oxidación del aceite [42].

1.3.1.4 PRESENCIA DE COMBUSTIBLE

Esta evaluación se lleva a cabo utilizando un probador de punto de inflamación, donde la muestra de aceite se somete a un calentamiento gradual hasta que se alcanza la evaporación de una mezcla de aire y combustible. Cuando dicha mezcla entra en contacto con una llama, se genera un destello. El probador se ajusta para medir el porcentaje de combustible presente en la muestra de aceite (siendo 4% la concentración máxima de combustible permitida) [41].

1.3.1.5 NÚMERO DE BASE TOTAL (TBN)

La prueba analiza la habilidad del aceite para contrarrestar los productos ácidos producidos durante la combustión del combustible. En entornos marinos que utilizan combustibles de alto contenido de azufre, se requiere un valor de TBN relativamente elevado, expresado en mg/KOH/g [42].

Figura 14

Valorador de la marca Mettler Toledo.



Tomado de: M. TOLEDO [44].

1.3.1.6 PRESENCIA DE ANTICONGELANTE

Esta prueba se realiza a través de un análisis químico, y cualquier rastro de glicol es considerado inaceptable. En ocasiones, algunos aceites nuevos pueden mostrar indicios de glicol. Si se detecta la presencia de glicol, se examina si esto coincide con un aumento en la concentración de sodio en los aditivos suplementarios utilizados en el sistema de refrigeración [41].

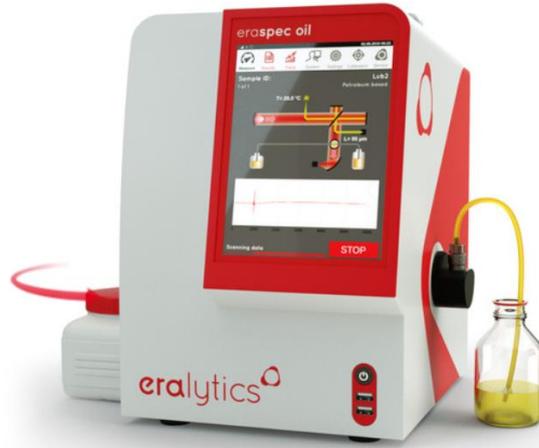
1.3.1.7 ANÁLISIS INFRARROJO

Esta prueba tiene como finalidad determinar y cuantificar la presencia de contaminantes tales como hollín, azufre, productos de oxidación y nitración en el aceite. Además, es capaz de identificar la posible presencia de combustible, agua y anticongelante. Para lograr un diagnóstico preciso, es fundamental combinar el análisis infrarrojo con las pruebas de desgaste, así como las pruebas químicas y físicas. El análisis infrarrojo es fundamental, ya que posibilita ajustar los intervalos de cambio de aceite (reduciéndolos,

manteniéndolos o prolongándolos) según las condiciones de operación y las aplicaciones particulares [41].

Figura 15

Equipo Eraspec oil, para determinar degradación del aceite.



Tomado de: ERASPEC OIL [58]

1.3.1.8 ANÁLISIS ESPECTROMÉTRICO

En este método, se utiliza un espectrofotómetro para monitorear la velocidad de desgaste de un componente específico mediante la identificación y cuantificación de la concentración de elementos de desgaste del motor presentes en el aceite. Estos elementos, como el cobre, hierro, cromo, plomo, aluminio, silicio, sodio, calcio, magnesio, zinc, entre otros, se cuantifican en partes por millón (ppm) a través de la vaporización y combustión de una pequeña cantidad de aceite en el espectrofotómetro. Aunque este método resulta altamente efectivo para partículas de tamaño submicrónico, su eficacia disminuye considerablemente a medida que el tamaño de partícula se acerca a los 5 micrones debido a las complicaciones en la vaporización de partículas en el rango de 5 a 10 micrones. No obstante, este enfoque es una herramienta eficaz para medir los niveles de concentración de aditivos en el aceite y rastrear su agotamiento [42].

Figura 16

Equipo Spectroil para determinar elementos metálicos presentes en el aceite.



Tomado de: SpectrOil 100 Series [59]

1.4 TIPOS DE MANTENIMIENTO

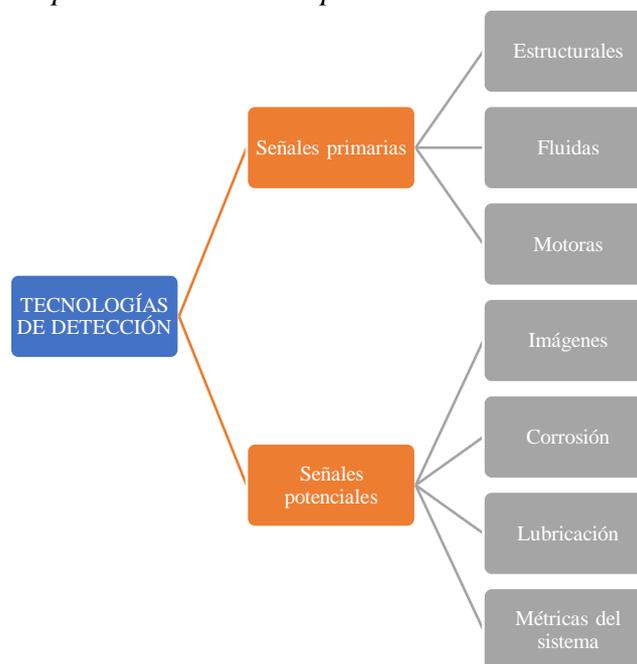
El mantenimiento se divide en dos categorías principales: reactivo y proactivo. El mantenimiento reactivo, también llamado mantenimiento en averías, se realiza después de que un componente o equipo falla, lo que resulta en tiempos de inactividad no planificados y pérdidas de producción. Por otro lado, el mantenimiento proactivo tiene como objetivo prevenir o minimizar fallas y se divide en dos tipos: preventivo y predictivo. El mantenimiento preventivo involucra la reparación o reemplazo de componentes en intervalos regulares definidos por el fabricante, sin considerar el estado real del componente. Esto puede llevar a una subutilización de la vida útil del equipo. En contraste, el mantenimiento predictivo, o basado en la condición, se centra en la detección temprana de fallas incipientes al monitorear el estado del equipo. Su objetivo es evitar actividades de mantenimiento innecesarias, interviniendo solo cuando se detecta un comportamiento anormal del equipo, lo que depende de la adquisición, procesamiento y análisis de datos [45], [46].

1.4.1 MANTENIMIENTO PREDICTIVO O MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN (CM)

Dentro del proceso del CM, se emplean diversas señales para rastrear el estado de las máquinas. Estas señales monitoras se dividen en dos categorías según su aplicación. Las señales ampliamente utilizadas se consideran señales primarias, mientras que aquellas con el potencial de utilizarse en el monitoreo se clasifican como señales potenciales [45].

Figura 17

Técnicas de detección para mantenimiento predictivo.



Tomado de: N. Lakal et al [45].

El monitoreo y diagnóstico de las máquinas se basa en señales primarias divididas en tres categorías: estructurales, fluidas y motoras, como se muestra en la **Figura 17**. Las señales

estructurales evalúan vibraciones, tensiones, deformaciones y fuerzas en la máquina y sus componentes. Las señales de fluidos abarcan la medición de temperatura, presión, caudal y humedad. Además, las señales del motor, como voltaje, corriente y potencia, son cruciales para evaluar su estado. El avance tecnológico en imágenes permite utilizarlas para controlar la temperatura, evaluar la rugosidad y detectar corrosión en componentes, mientras que el lubricante se convierte en una señal para evaluar el estado y desgaste mediante la inspección de partículas residuales y propiedades químicas. A veces, el estado general del sistema se monitorea mediante el nivel de ruido, reflejando condiciones defectuosas en niveles superiores a lo normal [45].

1.4.2 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El mantenimiento correctivo abarca todas las actividades dirigidas a restablecer un sistema a un estado específico cuando se produce una falla. Estas actividades pueden involucrar cualquiera de los siguientes pasos, ya sea de forma individual o en combinación: localización de la falla, aislamiento de la misma, desmontaje, reemplazo, ensamblaje, ajustes y pruebas [47].

1.4.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo (MP) es un enfoque que abarca la inspección periódica y la aplicación de acciones correctivas para prevenir fallas inesperadas, interrupciones en la producción y daños en maquinaria, componentes y sistemas de control. Este enfoque implica la atención regular a áreas específicas que se han identificado previamente como críticas. A pesar de su importancia, el MP puede presentar desafíos, ya que en ocasiones puede sugerir áreas que no requieren intervención en el momento programado o pasar por alto elementos que realmente necesitan mantenimiento. La clave para el éxito del MP radica en llevar a cabo una inspección minuciosa y centrarse en los elementos cruciales, evitando caer en prácticas de mantenimiento superficial [48], [49].

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 MATERIALES

2.1.1 MOTORES

Los motores bajo análisis en este estudio son de la marca Scania, específicamente del modelo K460, y están instalados en dos autobuses de tipo doble piso destinados al servicio interprovincial. La **Figura 18 (a)** indica el autobús perteneciente a la cooperativa Flota Imbabura, esta unidad posee un motor nuevo con apenas 148.000 kilómetros como lo indica la **Figura 18 (c)**. Por otra parte, el autobús de la cooperativa Transportes Ecuador, **Figura 18 (b)**, posee un motor más recorrido, con un kilometraje de 998.010 kilómetros, tal como lo indica la **Figura 18 (d)**.

A continuación, en la

- (a) Bus de la cooperativa Flota Imbabura, con 148.023 km de recorrido, como lo indica la imagen (c)
- (b) Bus de la cooperativa Transportes Ecuador, con 998.010 km de recorrido, como lo indica la imagen (d)

Tabla 7 y **Tabla 8**, se presentan en detalle las características de estos autobuses.

Figura 18

Buses interprovinciales utilizados para el estudio, con sus respectivos kilometrajes.



(a)



(b)



(c)



(d)

- (c) Bus de la cooperativa Flota Imbabura, con 148.023 km de recorrido, como lo indica la imagen (c)
- (d) Bus de la cooperativa Transportes Ecuador, con 998.010 km de recorrido, como lo indica la imagen (d)

Tabla 7

Especificaciones técnicas del autobús de la cooperativa Flota Imbabura [50].

| AUTOBÚS FLOTA IMBABURA | |
|-------------------------------|--------------------------|
| Modelo y carrocería | Marcopolo G8 DD, 2023 |
| Motor | Scania DC13 106 EURO III |
| Kilometraje motor | 148.000 |
| Potencia @ 1900 rpm | 338 [kW] – 460 [HP] |
| Torque @ 1000-1350 rpm | 2000 [Nm] |
| Cilindrada | 12.74 [litros] |
| Cilindros | 6 en línea |
| Válvulas | 4 por cilindro |

Tabla 8

Especificaciones técnicas del autobús de la cooperativa Transportes Ecuador [50].

| AUTOBÚS TRANSPORTES ECUADOR | |
|------------------------------------|--------------------------|
| Modelo y carrocería | Marcopolo G7 DD, 2015 |
| Motor | Scania DC13 106 EURO III |
| Kilometraje motor | 998.010 |
| Potencia @ 1900 rpm | 338 [kW] – 460 [HP] |
| Torque @ 1000-1350 rpm | 2000 [Nm] |
| Cilindrada | 12.74 [litros] |
| Cilindros | 6 en línea |
| Válvulas | 4 por cilindro |

Figura 19

(a)Motor del autobús Flota Imbabura. (b)Motor del autobús Transportes Ecuador.



2.1.1.1 RUTAS QUE CUBREN LOS AUTOBUSES

Las rutas de los autobuses de doble piso varían según la cooperativa a la que pertenecen, lo cual constituye un factor crucial a considerar al analizar el aceite. Este aspecto cobra relevancia debido a que, en función de la geografía de las carreteras y las condiciones climáticas, el motor experimenta distintos niveles de esfuerzo.

La cooperativa Flota Imbabura opera en diversas ciudades de Ecuador, siendo sus destinos principales Manta, Guayaquil y Cuenca. Sus puntos de partida destacados incluyen Quito, Ibarra y Tulcán. En contraste, la cooperativa Transportes Ecuador se limita a cubrir la ruta exclusiva entre Quito y Guayaquil. En las **Tabla 9** y **Tabla 10** se indican las diferentes rutas que cumplen estos autobuses.

Tabla 9

Rutas que cubre el autobús de Transportes Ecuador.

| Rutas del autobús Transportes Ecuador | |
|--|-----------------------------|
| Ruta | Distancia aproximada |
| Quito - Guayaquil | |
| Guayaquil - Quito | 410 kilómetro |

Tabla 10

Rutas más largas que cubre el autobús de Flota Imbabura.

| Rutas del autobús Flota Imbabura | |
|---|-----------------------------|
| Ruta | Distancia aproximada |
| Tulcán - Guayaquil | |
| Guayaquil - Tulcán | 675 kilómetros |
| Tulcán – Manta | |
| Manta – Tulcán | 635 kilómetros |
| Tulcán – Cuenca | |
| Cuenca - Tulcán | 690 kilómetros |

2.1.2 KIT DE EXTRACCIÓN DE ACEITE

- Envase: Se trata de un contenedor transparente elaborado en plástico transparente, que ha sido previamente desinfectado y se presenta completamente sellado en el interior de una bolsa plástica. Este recipiente se destina al almacenamiento del aceite.
- Bomba de vacío: Este equipo se utiliza para extraer muestras de líquidos tanto de sistemas presurizados como no presurizados. Es compatible con mangueras y botellas de diversas dimensiones, y su funcionamiento es manual [51].
- Sonda: Facilita el flujo del aceite desde el cárter hacia el envase.

Figura 20

Kit de extracción de aceite.



2.1.3 EQUIPOS PARA ANÁLISIS

En la **Tabla 11**, se presenta un desglose de los equipos empleados durante las diversas pruebas efectuadas en las muestras de aceite usado, junto con la especificación del tipo de prueba realizado para evaluar el desgaste y/o la contaminación del aceite. Esta relación de equipos fue suministrada por el laboratorio de la empresa "Lubrisa".

Tabla 11

Equipos empleados para realizar el análisis del aceite.

| EQUIPO | MARCA | MEDICIÓN |
|------------------------------|----------------|----------------------------|
| Plancha | ----- | Humedad |
| Baño de viscosidad | ----- | Viscosidad a 100 y a 40 °C |
| Titulador potenciométrico | Mettler Toledo | TBN |
| Spectroil M (aceites usados) | Spectro | Metales y |
| Spectroil Q100 (producción) | | Aditivos |
| FT-IR (Eraspec oil) | Eralytics | Hollín |

2.2 MÉTODOS

2.2.1 IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Para lograr una identificación precisa de la muestra de aceite, se ha desarrollado un formato de etiqueta, como se muestra en la **Figura 21**. En este formato, se destacan parámetros esenciales, como la compañía a la que pertenece el autobús, la marca y modelo del vehículo, el compartimento del cual se extrajo el aceite, el tipo de combustible utilizado, el kilometraje total del motor, el kilometraje del aceite lubricante, la especificación y grado del aceite, así como la fecha de extracción del aceite.

Figura 21

Etiqueta para identificación de la muestra.

| IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA | |
|------------------------------|-------|
| Compañía | ----- |
| Marca y modelo | ----- |
| Compartimento | ----- |
| Tipo de combustible | ----- |
| Kilómetros motor | ----- |
| Kilómetros aceite | ----- |

| | |
|-------------------|-------|
| Tipo de aceite | ----- |
| Grado | ----- |
| Fecha de muestreo | ----- |

2.2.2 PROPIEDADES DE LOS ACEITES ANALIZADOS.

Es crucial tener un conocimiento detallado de las propiedades iniciales de los aceites lubricantes empleados en este análisis. Esto permite realizar una comparación y evaluación adecuada del desgaste experimentado por estos durante el período de funcionamiento del motor.

En las siguientes tablas, se proporcionan las distintas propiedades de los aceites utilizados en los autobuses. La **Tabla 12** detalla las propiedades del aceite utilizado por el motor con 148 000 kilómetros, mientras que la **Tabla 13** presenta las propiedades del aceite empleado por el motor con 998 000 kilómetros.

Tabla 12

Especificaciones técnicas del aceite usado en el motor con 148 000 kilómetros.

| ACEITE USADO EN EL MOTOR CON 148 000 KM | |
|--|-----------------------|
| Marca | Roshfrans Voltro Plus |
| Grado | SAE 15W40 |
| Viscosidad cinemática @ 100°C | 15 [cSt] |
| Viscosidad cinemática @ 40°C | 109.9 [cSt] |
| Índice de viscosidad | 142 |
| Densidad @ 15.6°C | 0.8748 [kg/L] |
| Número de base | 11.9 [mg KOH/g] |

Tabla 13

Especificaciones técnicas del aceite usado en el motor con 998 000 kilómetros.

| ACEITE USADO EN EL MOTOR CON 998 000 KM | |
|--|------------------------|
| Marca | Fuchs Titan Truck Plus |
| Grado | SAE 15w40 |
| Viscosidad cinemática @ 100°C | 14.9 [cSt] |
| Viscosidad cinemática @ 40°C | 114.9 [cSt] |
| Índice de viscosidad | 135 |
| Densidad @ 15.6°C | 0.879 [kg/L] |
| Número de base | 11.5 [mgKOH/g] |

2.2.3 CONTAMINANTES DEL ACEITE

Se establecen dos categorías de contaminantes en el aceite lubricante. La primera se refiere a los contaminantes metálicos, detallados en la **Tabla 14**, originados por el desgaste de diversas piezas del motor. La segunda categoría abarca los contaminantes no metálicos, especificados en la **Tabla 15**, que pueden provenir del refrigerante, combustible, aditivos o del polvo que ingresa al motor debido a la deficiente condición de los filtros.

Las tablas siguientes presentan un listado de ambos tipos de contaminantes en el aceite lubricante.

Tabla 14

Elementos contaminantes metálicos [29], [43], [52], [54].

| Elementos motor | Metales |
|------------------------|---------------------------------------|
| Bloque motor | Hierro |
| Válvulas | Hierro, Vanadio |
| Guía de válvulas | Hierro, Cobre, Níquel, Cromo |
| Árbol de levas | Hierro, Níquel |
| Pistones | Hierro |
| Anillos de pistón | Cromo |
| Camisas | Hierro |
| Cigüeñal | Hierro, Níquel |
| Bielas | Hierro |
| Cojinetes de biela | Cobre, Plomo, Aluminio, Plata, Estaño |
| Cojinetes de bancada | Cobre, Aluminio |
| Rodamientos | Aluminio, Plata |

Tabla 15

Elementos contaminantes no metálicos [29], [43], [52], [54].

| Fuente de contaminación | Metales |
|--------------------------------|---|
| Polvo | Silicio, Aluminio |
| Refrigerante | Silicio, Sodio, Magnesio, Boro, Potasio |
| Combustible | Sodio, Magnesio, Boro, Vanadio |
| Aditivo antiespumante | Silicio |
| Aditivo antidesgaste | Zinc, Fósforo |
| Aditivo detergente | Calcio |

2.2.4 DEGRADACIÓN DEL ACEITE

Además de la contaminación, el aceite lubricante experimenta deterioro al entrar en contacto con ciertos compuestos presentes en los gases de combustión o con determinados contaminantes no metálicos, lo que ocasiona su oxidación. Estos procesos de desgaste del aceite incluyen la oxidación, sulfatación y nitración.

2.2.4.1 OXIDACIÓN.

Cuando el aceite lubricante se expone a un agente oxidante, experimenta una reacción catalizada por altas temperaturas y oxígeno, alterando su estructura molecular. Esto resulta en un aumento de la acidez del aceite, afectando su capacidad para formar películas de lubricación. La oxidación ocurre cuando la base del lubricante, compuesta mayormente de hidrocarburos, reacciona con el oxígeno atmosférico a temperaturas superiores a 400 °C, generando ácidos carboxílicos. Estos ácidos producen radicales alcoxi e hidroxilos, que a su vez reaccionan con la base lubricante, formando lodo y

radicales peroxilo. Estos últimos reinician el ciclo, perpetuando el proceso de oxidación [53].

2.2.4.2 NITRACIÓN.

Determinados elementos presentes en los gases de combustión, como el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), tienen la capacidad de interactuar con el aceite lubricante en la cámara de combustión. A elevadas temperaturas, se generan compuestos de nitrógeno inestables y órgano-nitritos, contribuyendo así a un incremento en la tasa de degradación del aceite y promoviendo la formación de lodos y barnices no deseados [53].

2.2.4.3 SULFATACIÓN.

Así como sucede con la nitración, la sulfatación es un proceso que tiene lugar en la cámara de combustión, donde se produce una reacción entre el aceite y los óxidos de azufre (SO_x), dando como resultado la formación de compuestos orgánicos de azufre no deseados [53].

2.2.5 NORMAS QUE RIGEN LAS PRUEBAS DE ANÁLISIS DE ACEITE.

2.2.5.1 ASTM D2896 – MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA NÚMERO DE BASE EN PRODUCTOS DE PETRÓLEO POR VALORACIÓN POTENCIOMÉTRICA CON ÁCIDO PERCLÓRICO.

Se utiliza para medir el Número Total de Base (TBN) y es efectivo tanto en aceites nuevos como usados, destacándose como uno de los métodos más precisos. La metodología implica la identificación de los componentes básicos a través de una titulación con ácido perclórico en ácido acético glacial. Este enfoque consta de dos procedimientos que emplean distintos tamaños y volúmenes [54].

2.2.5.2 ASTM D6595 - MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE METALES DE DESGASTE Y CONTAMINANTES EN ACEITES LUBRICANTES USADOS Y FLUIDOS HIDRÁULICOS USADOS POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ATÓMICA CON ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO.

Método de ensayo convencional para identificar la existencia de partículas contaminantes y metales de desgaste en aceites lubricantes usados a través de la espectrometría de emisión atómica con electrodos de disco rotativo. Este método tiene la capacidad de detectar elementos de desgaste, incluyendo partículas de tamaño tan pequeño como 10 micrómetros [54].

2.2.5.3 ASTM D445 - MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE LÍQUIDOS TRANSPARENTES Y OPACOS (Y CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA).

Esta técnica de prueba establece un proceso para calcular la viscosidad cinemática, de productos líquidos derivados del petróleo, ya sean transparentes u opacos. Esta medición se realiza tomando el tiempo que tarda un volumen determinado de líquido en fluir por gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio previamente calibrado. La viscosidad dinámica se puede obtener multiplicando la viscosidad cinemática por la densidad del líquido [56].

2.2.5.4 ASTM E2412 - MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA MONITOREO DE CONDICIÓN DEL LUBRICANTE EN SERVICIO POR ANÁLISIS DE TENDENCIA MEDIANTE ESPECTROMETRÍA INFRARROJA TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR).

Esta práctica aborda la utilización de FT-IR para supervisar el agotamiento de aditivos, la acumulación de contaminantes y el deterioro del material base en lubricantes de maquinaria, fluidos hidráulicos y otros líquidos empleados durante la operación normal de la maquinaria. Los contaminantes bajo observación abarcan agua, hollín, etilenglicol y combustibles. Se monitorea la oxidación, nitratación y sulfatación de las materias primas como indicadores de la degradación [57].

Tabla 16

Resumen de las normas ASTM y sus respectivas mediciones.

| Norma | Medición |
|--------------|---------------------------|
| ASTM D2896 | TBN |
| ASTM D6595 | Metales y aditivos |
| ASTM D445 | Viscosidad |
| ASTM E2412 | Degradación de lubricante |

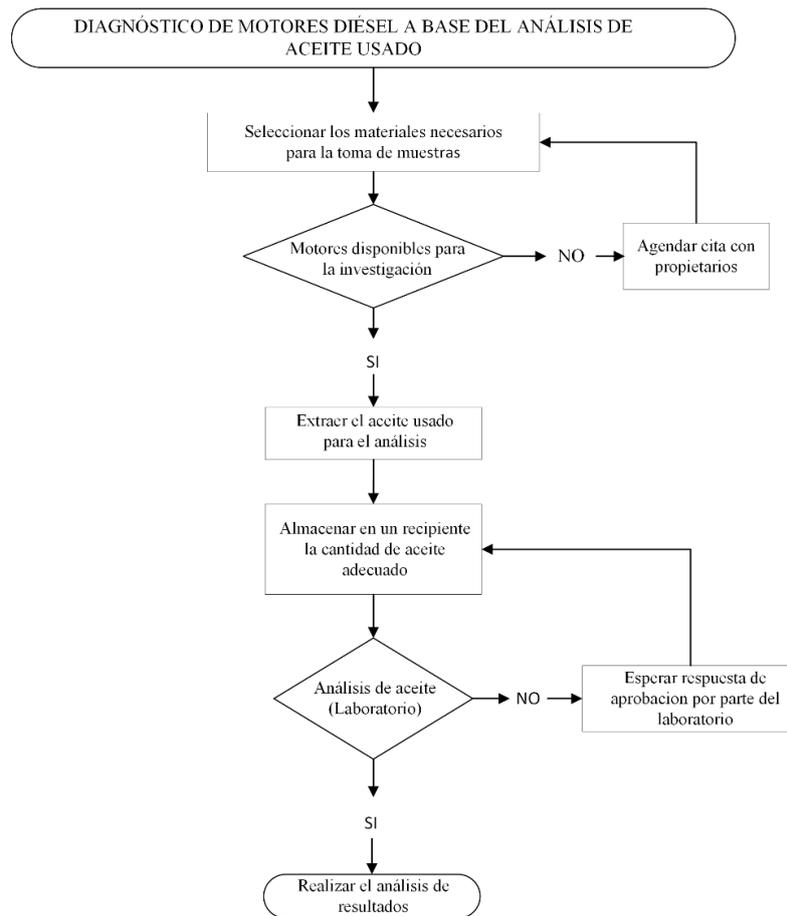
2.2.6 METODOLOGÍA GENERAL

En esta sección, se detallan los pasos fundamentales para llevar a cabo el análisis de aceite. Es importante contar con el kit de extracción, las unidades de doble piso de servicio interprovincial, equipadas con el motor Scania k460 y la autorización del laboratorio de la empresa "Lubrisa" para llevar a cabo las pruebas de contaminación y desgaste de los aceites, en sus instalaciones.

Una vez que las muestras de aceite hayan sido enviadas al laboratorio, se aguardarán los resultados relativos a la contaminación y/o desgaste del aceite. Posteriormente, se procederá a realizar el análisis de dichos resultados para poder realizar un correcto diagnóstico de dichos motores.

Figura 22

Flujograma de la metodología para realizar un correcto análisis de aceite usado.



2.2.6.1 MATERIALES PARA LA TOMA DE MUESTRA.

Para realizar este estudio, es esencial disponer de un kit de extracción de aceite, tal como se muestra en la **Figura 20**. Este kit incluye una sonda, un contenedor para almacenar el aceite extraído y una bomba de vacío. Al ensamblar estos componentes, se facilita la recolección eficiente del aceite desde el cárter.

2.2.6.2 MOTORES PARA LA INVESTIGACIÓN.

Se requieren dos motores idénticos en modelo y marca, pero con distintos recorridos de kilometraje. Para la ejecución de este proyecto, se ha optado por emplear motores de la marca Scania, específicamente del modelo K460, cuyas especificaciones técnicas se encuentran detalladas en la **Tabla 7**. Se dispone de un motor seminuevo con un kilometraje de 148,023 kilómetros como los indica la **Figura 18 (c)**, así como de otro motor usado que ha recorrido 998,010 kilómetros, **Figura 18 (d)**.

2.2.6.3 EXTRAER EL ACEITE USADO PARA EL ANÁLISIS.

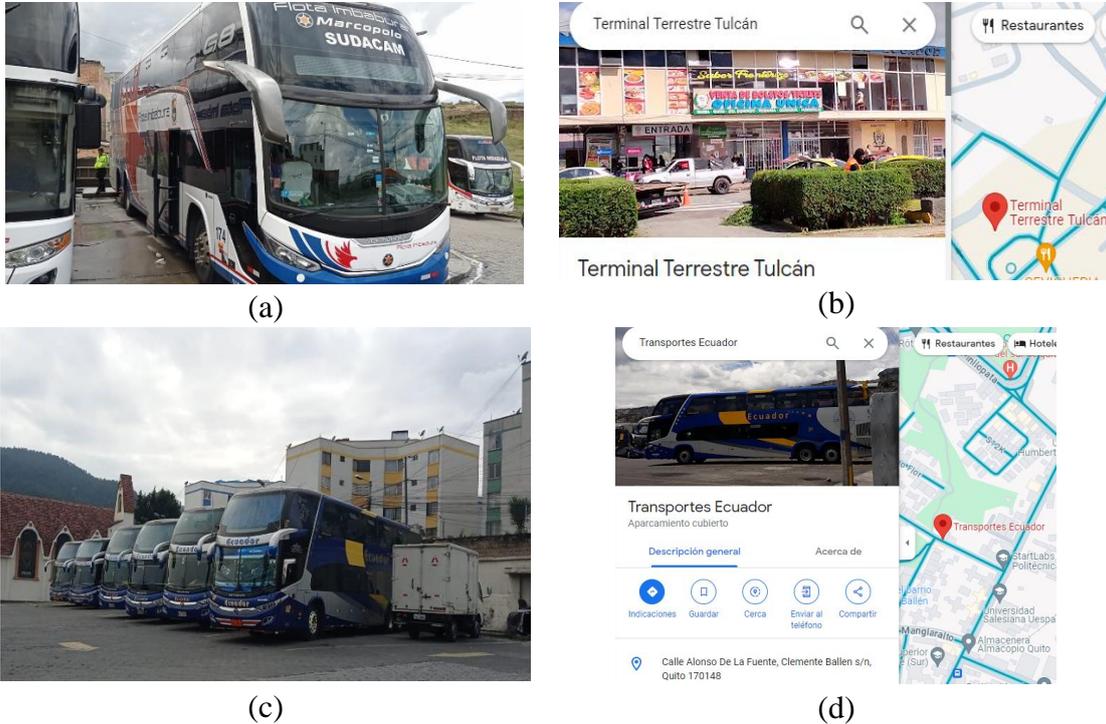
Una vez que el motor esté operando en condiciones óptimas, es decir, alcanzando la temperatura de trabajo adecuada y sin presentar fallas mecánicas, se inicia la extracción del aceite mediante el uso del kit especializado. Es crucial succionar el aceite directamente desde el cárter para prevenir la contaminación por agentes externos.

En el caso del motor con 148 000 kilómetros, se llevó a cabo la extracción del aceite en la ciudad de Tulcán, en la lavadora y lubricadora de confianza de la tripulación de la unidad. Por otro lado, para el motor con 998 000 kilómetros, la extracción del aceite se

efectuó en la ciudad de Quito, en el taller de la empresa Transportes Ecuador ubicado al sur de la ciudad, específicamente en el sector de San Bartolo.

Figura 23

Lugares donde se realizó la extracción del aceite.



- (a) Bus de la cooperativa Flota Imbabura en la lubricadora en la ciudad de Tulcán, tal como lo indica la ubicación en la imagen (b).
- (e) Taller de la cooperativa Transportes Ecuador, ubicado en el sur de la ciudad de Quito, tal como lo indica la ubicación en la imagen (d).

2.2.6.4 ALMACENAMIENTO DEL ACIETE.

El aceite extraído debe ser almacenado en un recipiente que ha sido esterilizado previamente. Para una mayor protección contra la contaminación por agentes externos, este recipiente debe ser colocado dentro de una bolsa de tipo ziplock.

Figura 24

Almacenamiento de la muestra de aceite dentro de una bolsa tipo ziplock,



2.2.6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección, se llevará a cabo un análisis de los elementos contaminantes presentes en el aceite usado, con el objetivo de identificar qué componente del motor pudo haber ocasionado dicha contaminación y explorar sus posibles causas. Además, se investigarán las razones por las cuales el aceite pudo haber experimentado desgaste, en caso de que los resultados así lo indiquen.

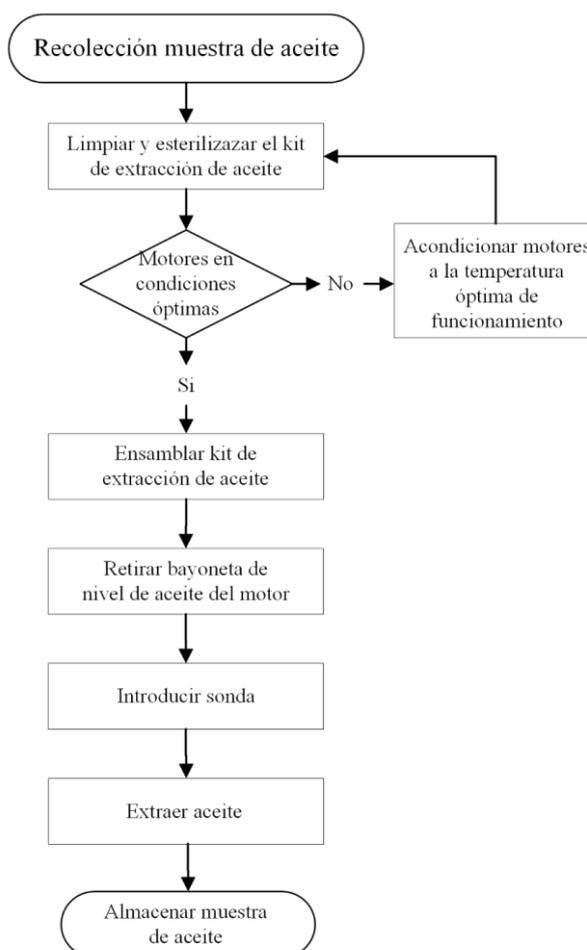
2.2.7 METODOLOGÍA DE EXTRACCIÓN DEL ACEITE

Para asegurar una recolección de aceite efectiva, se destaca la importancia de mantener la limpieza, con el fin de prevenir la contaminación del aceite y evitar cualquier interferencia en los resultados de las pruebas correspondientes. Para lograr esto, se debe llevar a cabo una limpieza exhaustiva de las áreas del motor de las cuales se extraerá el aceite, se debe mantener el kit de extracción en condiciones de máxima limpieza y evitar cualquier contacto con equipos que puedan contribuir a la contaminación.

Antes de proceder con la extracción del aceite, es esencial acondicionar los motores a la temperatura de funcionamiento. Esto facilitará un flujo óptimo del aceite y permitirá una detección más precisa de elementos contaminantes y desgaste durante las pruebas de la muestra extraída.

Figura 25

Flujograma para la extracción del aceite.



2.2.7.1 ESTERILIZACIÓN KIT DE EXTRACCIÓN DE ACEITE

Para prevenir la contaminación de la muestra de aceite, es fundamental realizar una limpieza y esterilización exhaustiva de todos los elementos del kit de extracción de aceite. Esto incluye la limpieza de la bomba de vacío para eliminar posibles residuos de aceites de tomas de muestra anteriores, así como la higienización de la sonda por donde fluirá el aceite.

Figura 26

Elementos del kit de extracción esterilizados, (a) bomba de vacío, (b) sonda, (c) envases de almacenamiento.

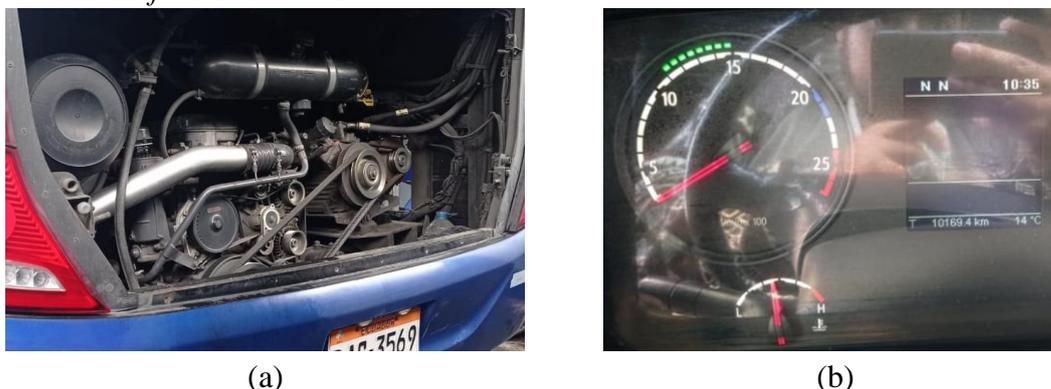


2.2.7.2 MOTORES EN CONDICIONES PARA TOMA DE MUESTRAS.

Para garantizar una recolección de muestras precisa, es imperativo que los motores cumplan con las condiciones óptimas. Esto implica haber alcanzado el intervalo designado para el cambio de aceite (10,000 kilómetros) como lo indica la **Figura 27 (b)**, asegurarse de que el motor esté operando a su temperatura nominal y, fundamentalmente, mantener los motores lo más limpios posible para evitar la contaminación con el entorno y el ambiente circundante.

Figura 27

(a) Motor limpio y en condiciones para la extracción de aceite, (b) Tablero indicando kilometraje recorrido necesario para realizar el cambio de aceite y la temperatura adecuada de funcionamiento.



2.2.7.3 ENSAMBLAR KIT DE EXTRACCIÓN DE ACEITE.

Para llevar a cabo la extracción del aceite, se requiere acoplar la sonda y el envase de recolección a la bomba de vacío. Luego, se introduce la sonda a través del orificio

correspondiente, donde se encuentra la bayoneta de nivel de aceite del motor, hasta que alcance la mitad de la profundidad del cárter donde se almacena el aceite del motor.

Figura 28

Kit ensamblado para extraer aceite



2.2.7.4 RETIRAR LA BAYONETA DE NIVEL DE ACEITE DE LOS MOTORES

La bayoneta es un elemento del motor, en el extremo de la varilla que llega al cárter posee indicadores del nivel máximo y mínimo de aceite, lo cual permite controlar el nivel de aceite del motor. Para poder recolectar la muestra de aceite, es necesario retirar la bayoneta de cada motor para que se pueda introducir la sonda para la extracción del aceite.

Figura 29

Retirar bayoneta de nivel de aceite del motor.



2.2.7.5 INTRODUCIR LA SONDA PARA EXTRAER EL ACEITE

La sonda actúa como el conducto a través del cual el aceite se desplaza desde el cárter hacia el recipiente de recolección. Es crucial que la longitud de la sonda sea precisa; por lo tanto, debe extenderse más allá de la mitad del cárter para posibilitar la extracción del aceite.

Figura 30

Sonda para extraer aceite.



2.2.7.6 EXTRACCIÓN DE ACEITE

Se utiliza una bomba de vacío para extraer el aceite, la cual incorpora un émbolo que facilita la succión del aceite. Esta bomba cuenta con un orificio destinado para acoplar el recipiente de recolección de la muestra, así como otro orificio por el cual se conecta la sonda encargada de transportar el aceite desde el cárter hacia el recipiente.

Figura 31

Proceso de extracción de aceite.



2.2.7.7 ALMACENAR MUESTRA DE ACEITE

El aceite extraído se almacena en un envase esterilizado, recomendándose su resguardo adicional dentro de una bolsa ziplock para prevenir cualquier contaminación ambiental. Después de recolectar la cantidad adecuada, aproximadamente las tres cuartas partes del contenedor, se completa una etiqueta informativa (ANEXO 2) que incluye detalles sobre el motor, la fecha de extracción del aceite y la información del lubricante utilizado. Este procedimiento garantiza la integridad de la muestra y facilita la identificación de los datos clave asociados a la extracción del aceite.

Figura 32

(a) Muestra de aceite debidamente almacenada y etiquetada. (b) Modelo de etiquetado para identificar la muestra



(a)

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

| | |
|---------------------|---------------------|
| Compañía | Transportes Ecuador |
| Marca y modelo | Scania k460 |
| Compartimento | Motor |
| Tipo de combustible | Diésel |
| Kilómetros motor | 998.010 |
| Kilómetros aceite | 10.170 |
| Tipo de aceite | Fuchs, Titan truck |
| Grado | 15W40 |
| Fecha de muestreo | 06/12/2023 |

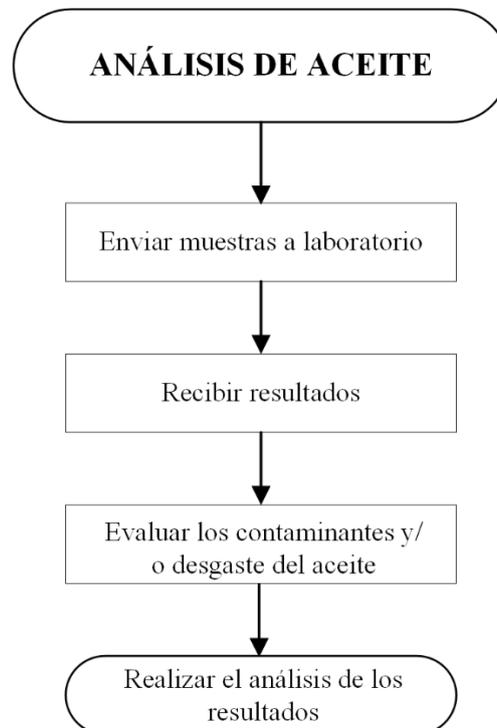
(b)

2.2.8 ANÁLISIS DEL ACEITE.

En esta etapa de la metodología, se llevó a cabo una investigación bibliográfica para obtener información detallada sobre los distintos elementos metálicos que componen las principales piezas móviles de los MEC, tales como pistones, anillos, válvulas, bielas, entre otros, tal como se indica en la **Tabla 6**.

Figura 33

Flujograma para realizar el análisis de aceite.



2.2.8.1 ENVIAR MUESTRAS DE ACEITE

Tras la aprobación de la solicitud para llevar a cabo el análisis en los laboratorios de "Lubrisa" y la recolección de las dos muestras de aceite a evaluar, se procede al envío de los aceites usados para realizar los análisis correspondientes de desgaste y/o contaminación.

Figura 34

Muestras de aceite etiquetadas y embaladas para envío.



2.2.8.2 RECIBIR RESULTADOS Y EVALUAR LA CONTAMINACIÓN Y/O DESGASTE DEL ACEITE

Una vez recibido los resultados de los análisis, se lleva a cabo el estudio y evaluación de la contaminación y/o desgaste del aceite. Este proceso implica una investigación previa sobre la composición de los elementos de un motor diésel que suelen contribuir comúnmente a la contaminación del aceite, así como los daños por fugas más frecuentes que estos motores pueden presentar.

Figura 35

Resultados recibidos por parte de la empresa "Lubrisa".

| | | REPORTE DE ANÁLISIS DE LUBRICANTE | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-----------------------------------|----------------|--|---|--------------------|--|------------|---------|--------|--------|-------|-------|----|----------|
|  | NOMBRE DEL CLIENTE: UNIVERSIDAD DEL NORTE | Compartimento: | MOTOR | | | | | | | | | | | | |
| | | Equipo: | FLOTA IMBABURA | | | | | | | | | | | | |
| | | Marca: | SCANIA | | | | | | | | | | | | |
| | | Serie: | | | | | | | | | | | | | |
| | | Modelo: | 460 | | | | | | | | | | | | |
| | | Lubricante: | 15W40 | | | | | | | | | | | | |
| | | Marca del Lubricante: | ROSHFRNS | | | | | | | | | | | | |
| INFORMACIÓN DE LA MUESTRA | | | | | | | | | | | | | | | |
| Numeración de Muestra | 12-23-G-19238 | | | | | | | | | | | | | | |
| Fecha de Muestreo | 2023-11-22 | | | | | | | | | | | | | | |
| Fecha de Ingreso | 2023-12-12 | | | | | | | | | | | | | | |
| Fecha de Informe | 2023-12-13 | | | | | | | | | | | | | | |
| Equipo Hrs/ Km | 148000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Acetate Hrs/ Km | 10600 | | | | | | | | | | | | | | |
| Condición | NORMAL | | | | | | | | | | | | | | |
| ESTADO DEL LUBRICANTE | | | | | | | | | | | | | | | |
| Viscosidad a 100°C, cSt | 13.7 | | | | | | | | | | | | | | |
| T.B.N. mgKOH/gr | 9.8 | | | | | | | | | | | | | | |
| Humedad | NEGATIVO | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | <table border="1"> <tr> <td colspan="2">* Rangos Generales</td> </tr> <tr> <td>Precaución</td> <td>Anormal</td> </tr> <tr> <td>< 12.3</td> <td>> 16.7</td> </tr> <tr> <td>< 5.0</td> <td>< 4.0</td> </tr> <tr> <td>..</td> <td>POSITIVO</td> </tr> </table> | * Rangos Generales | | Precaución | Anormal | < 12.3 | > 16.7 | < 5.0 | < 4.0 | .. | POSITIVO |
| * Rangos Generales | | | | | | | | | | | | | | | |
| Precaución | Anormal | | | | | | | | | | | | | | |
| < 12.3 | > 16.7 | | | | | | | | | | | | | | |
| < 5.0 | < 4.0 | | | | | | | | | | | | | | |
| .. | POSITIVO | | | | | | | | | | | | | | |

2.2.8.3 REALIZAR EL ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para realizar una interpretación precisa de los resultados, se considerarán las referencias de los rangos aceptables y no aceptables proporcionados por la empresa "Lubrisa" en relación con el estado y la contaminación del aceite (**Tabla 17**), así como el desgaste experimentado por el motor. Estos valores de referencia permitirán determinar si tanto el aceite como el motor se encuentran en condiciones óptimas, y si es posible extender el uso del aceite en el funcionamiento del motor.

Por otro lado, Widman [55], en su interpretación de un reporte de análisis de aceite, establece límites aceptados en la industria para motores diésel, independientemente de la marca. Estos límites se muestran en la **Tabla 18**.

Tabla 17

Rango de valores a tener en cuenta para el análisis de resultados.

| ESTADO DEL LUBRICANTE | PRECAUCIÓN | ANORMAL |
|---------------------------------------|-------------------|----------------|
| Viscosidad a 100°C [cSt] | < 12.3 | > 16.7 |
| TBN [mgOH/gr] | < 5.0 | < 4.0 |
| Humedad | ----- | Positivo |
| CONTAMINACIÓN LUBRICANTE - PPM | | |
| Silicio (Si) | ≥ 62 | ≥ 92 |
| Sodio (Na) | ≥ 40 | ≥ 60 |
| Vanadio (V) | ≥ 30 | ≥ 50 |
| Níquel (Ni) | ----- | ≥ 20 |
| DESGASTE DEL MOTOR - PPM | | |
| Hierro (Fe) | ≥ 100 | ≥ 273 |
| Cromo (Cr) | ≥ 20 | ≥ 31 |
| Aluminio (Al) | ≥ 30 | ≥ 62 |
| Cobre (Cu) | ≥ 78 | ≥ 139 |
| Plomo (Pb) | ≥ 25 | ≥ 80 |
| Estaño (Sn) | ≥ 15 | ≥ 20 |

Nota: Precaución: Estos valores proporcionan una advertencia leve sobre el estado del lubricante y el desgaste de las piezas del motor.

Anormal: Se refiere a valores que caen fuera del rango permisible, señalando una advertencia crítica sobre el estado del aceite y el desgaste de las piezas del motor.

Tabla 18

Valores límites de elementos contaminantes [55].

| Elemento | Normal | Anormal | Crítico |
|-----------------|---------------|----------------|----------------|
| Hierro (Fe) | <100 ppm | 100 a 200 ppm | >200 ppm |
| Plomo (Pb) | <30 ppm | 30 a 75 ppm | >75 ppm |
| Cobre (Cu) | <30 ppm | 30 a 75 ppm | >75 ppm |
| Cromo (Cr) | <10 ppm | 10 a 25 ppm | >25 ppm |
| Aluminio (Al) | <20 ppm | 20 a 30 ppm | >30 ppm |
| Níquel (Ni) | <10 ppm | 10 a 20 ppm | >20 ppm |
| Vanadio (V) | <30 ppm | 30 a 50 ppm | >50 ppm |
| Plata (Ag) | <3 ppm | 3 a 15 ppm | >15 ppm |
| Estaño (Sn) | <20 ppm | 20 a 30 ppm | >30 ppm |
| Sodio (Na) | <50 ppm | 50 a 200 ppm | >200 ppm |
| Silicio (Si) | <20 ppm | 20 a 50 ppm | >50 ppm |
| Hollín | <2 % | 2 a 6 % | >6 % |

Nota: Normal: Valores normales de los elementos que posee el aceite lubricante, donde no se ve afectado su estado.

Anormal: Se refiere a valores que caen fuera del rango permisible, señalando una advertencia sobre el estado del aceite y el desgaste de las piezas del motor.

Crítico: Estos valores indican que tanto el estado del aceite como del motor es crítico, requiriendo una acción inmediata.

Tabla 19

Valores a tomar en cuenta para el análisis de la viscosidad y el TBN en los aceites usados.

| Propiedades | Rangos generales | |
|-------------------------|-------------------------|----------------|
| | Precaución | Anormal |
| Viscosidad a 100°C, cSt | < 12.3 | >16.7 |
| TBN mgKOH/gr | < 5.0 | < 4.0 |

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Para analizar los resultados obtenidos y discutir el estado de salud del lubricante y su nivel de contaminación, es fundamental comprender las diversas rutas que recorren estos autobuses. Es imperativo considerar la geografía y las condiciones climáticas a las que están expuestos estos motores, ya que esto influye en el funcionamiento a diferentes regímenes. En consecuencia, la lubricación del motor también se verá afectada de manera única, lo que determinará el grado de deterioro del aceite.

Cada motor utiliza un aceite de grado SAE 15W40, pero de marcas diferentes, lo que implica que la composición de la base y los aditivos presentes en estos lubricantes también varía y ejerce influencia en su desempeño.

3.1 ANÁLISIS PARA EL MOTOR DE 148 000 KILÓMETROS.

El motor seminuevo, perteneciente al autobús de la cooperativa Flota Imbabura realiza trayectos en dos regiones de Ecuador, siguiendo las siguientes rutas:

- Sierra – Sierra
- Sierra – Costa

En la ruta Sierra – Sierra, abarca el trayecto desde Tulcán hasta Cuenca, atravesando montañas y valles a diversas altitudes. La altura máxima alcanzada es de 3,264 metros sobre el nivel del mar al pasar por la ciudad de Mocha en la provincia de Tungurahua, mientras que la altura más baja es de 2,500 metros sobre el nivel del mar al pasar por la ciudad de Ambato en la misma provincia.

Entre las rutas que comprenden las regiones de la costa y sierra, se encuentran:

- Tulcán – Manta
- Tulcán – Guayaquil

Durante estos recorridos, el autobús atraviesa varias ciudades de Ecuador, enfrentándose a diferentes altitudes. La ciudad de Huaca, en la provincia de Carchi, representa la altitud máxima a la que llega el autobús, alcanzando los 3,000 metros sobre el nivel del mar. En contraste, las ciudades de Manta y Guayaquil, ubicadas en las provincias de Manabí y Guayas respectivamente, se encuentran prácticamente al nivel del mar.

En la **Tabla 20** se presentan los resultados obtenidos del análisis de aceite del motor, así como la marca de aceite que este usa.

Tabla 20

Resultados obtenidos del análisis del aceite del motor con 148 000 kilómetros.

| INFORMACIÓN DE LA MUESTRA | |
|---------------------------|-----------------------|
| Numeración de la muestra | OCM-01 |
| Marca del aceite | Roshfrans Voltro Plus |
| Grado | SAE 15W40 |
| Fecha de muestreo | 22/11/2023 |
| Kilometraje motor | 148 000 |
| Kilometraje aceite | 10 600 |

| ESTADO DEL LUBRICANTE | |
|---|----------|
| Viscosidad a 100°C [cSt] | 13.7 |
| TBN [mgKOH/gr] | 9.8 |
| Humedad | Negativo |
| CONTAMINACIÓN DEL LUBRICANTE - PPM | |
| Silicio (Si) | 18 |
| Sodio (Na) | 3 |
| Vanadio (V) | 2 |
| Níquel (Ni) | 0 |
| DESGASTE DEL EQUIPO – PPM | |
| Hierro (Fe) | 17 |
| Cromo (Cr) | 2 |
| Aluminio (Al) | 4 |
| Cobre (Cu) | 2 |
| Plomo (Pb) | 3 |
| Estaño (Sn) | 1 |
| PRESENCIA DE ADITIVOS – PPM | |
| Calcio (Ca) | 4366 |
| Magnesio (Mg) | 29 |
| Zinc (Zn) | 1446 |
| Fósforo (P) | 794 |

3.1.1 DEGRADACIÓN DEL LUBRICANTE.

Para llevar a cabo un análisis de la degradación del aceite, es fundamental contrastar los resultados obtenidos mediante las pruebas de laboratorio con los valores de fábrica del aceite sin usar. Los parámetros clave para esta comparación son la viscosidad cinemática y el índice TBN, los cuales se detallan en la **Tabla 21**.

Tabla 21

Comparación de valores del aceite nuevo vs el aceite usado del motor con 148 000 km.

| Valores a comparar | Aceite nuevo | Aceite usado |
|---------------------------|---------------------|---------------------|
| Viscosidad a 100 °C [cSt] | 15 | 13.7 |
| TBN [mgKOH/gr] | 11.9 | 9.8 |

Al analizar los valores de la viscosidad, se evidencia una disminución de 1.3 [cSt]. Esta reducción podría indicar que la película lubricante se ve comprometida debido a las condiciones operativas del motor y a las elevadas temperaturas alcanzadas. Este fenómeno propicia la oxidación del lubricante, incrementando la fricción entre las superficies de contacto de las piezas móviles del motor, lo que potencialmente podría resultar en un desgaste prematuro de dichas piezas.

En cuanto al TBN, encargado de neutralizar los ácidos generados durante la combustión del motor, también se observa una reducción de 2.1 puntos. La disminución del TBN puede atribuirse a factores como corrosión, elevados niveles de ácidos, desgaste de

aditivos o incluso a una operación inapropiada del motor, lo que conlleva a una disminución en la vida útil del lubricante. Para prevenir una continua disminución de este parámetro y mitigar el impacto en el aceite, se sugiere considerar la reducción de los intervalos de cambio, mejorar el funcionamiento del motor y supervisar la temperatura de operación de manera constante.

3.2 ANÁLISIS PARA EL MOTOR DE 998 000 KILÓMETROS.

A diferencia de la cooperativa Flota Imbabura, la cooperativa Transportes Ecuador se limita a recorrer las regiones de la costa y la sierra, cubriendo exclusivamente la ruta Quito – Guayaquil y viceversa. En consecuencia, la altitud máxima a la que opera el motor de este autobús es de 2,850 metros sobre el nivel del mar, en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, mientras que la altitud mínima se registra en la ciudad de Guayaquil, provincia de Guayas, que se encuentra prácticamente al nivel del mar.

En la **Tabla 22**, se presentan los resultados obtenidos del análisis de aceite del motor, así como la marca de aceite que este usa.

Tabla 22

Resultados obtenidos del análisis del aceite del motor con 998 000 kilómetros.

| INFORMACIÓN DE LA MUESTRA | |
|---|------------------------|
| Numeración de la muestra | OCM-02 |
| Marca del aceite | Fuchs Titan Truck Plus |
| Grado | SAE 15W40 |
| Fecha de muestreo | 06/12/2023 |
| Kilometraje motor | 998 010 |
| Kilometraje aceite | 10 170 |
| ESTADO DEL LUBRICANTE | |
| Viscosidad a 100°C [cSt] | 13.3 |
| TBN [mgKOH/gr] | 7.8 |
| Humedad | Negativo |
| CONTAMINACIÓN DEL LUBRICANTE - PPM | |
| Silicio (Si) | 9 |
| Sodio (Na) | 3 |
| Vanadio (V) | 2 |
| Níquel (Ni) | 1 |
| DESGASTE DEL EQUIPO – PPM | |
| Hierro (Fe) | 9 |
| Cromo (Cr) | 2 |
| Aluminio (Al) | 4 |
| Cobre (Cu) | 2 |
| Plomo (Pb) | 2 |
| Etaño (Sn) | 3 |
| PRESENCIA DE ADITIVOS – PPM | |
| Calcio (Ca) | 2714 |
| Magnesio (Mg) | 34 |

| | |
|-------------|------|
| Zinc (Zn) | 1450 |
| Fósforo (P) | 813 |

3.2.1 DEGRADACIÓN DEL LUBRICANTE.

Basándose en los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, se realiza una comparación con los valores iniciales del aceite sin usar para determinar la degradación del lubricante. Los datos correspondientes a este análisis se presentan en la **Tabla 23**.

Tabla 23

Comparación de valores del aceite nuevo vs el aceite usado del motor con 998 000 km.

| Valores a comparar | Aceite nuevo | Aceite usado |
|---------------------------|--------------|--------------|
| Viscosidad a 100 °C [cSt] | 14.9 | 13.3 |
| TBN [mgKOH/gr] | 11.5 | 7.8 |

Al examinar los valores de la viscosidad, se observa una reducción de 1.6 [cSt]. Esta disminución sugiere que la película lubricante puede estar comprometida debido a las condiciones operativas del motor, las altas temperaturas alcanzadas y el extenso recorrido del motor, que asciende a 998 010 kilómetros. Este fenómeno facilita la oxidación del lubricante, aumentando la fricción entre las superficies de contacto de las piezas móviles del motor y potencialmente provocando un desgaste prematuro de dichas piezas.

A pesar de los aproximadamente 9 años de funcionamiento del motor, no se observa una disminución excesiva en la viscosidad del aceite. Este fenómeno puede atribuirse a los adecuados mantenimientos realizados en esta unidad, según la información proporcionada por el técnico del taller de la empresa de Transportes Ecuador. Además, el técnico señaló que se llevaron a cabo procesos específicos de mantenimiento como el enchaquetado y enrinado alrededor de los 500 000 kilómetros, siguiendo las recomendaciones del fabricante del motor para así alargar su vida útil.

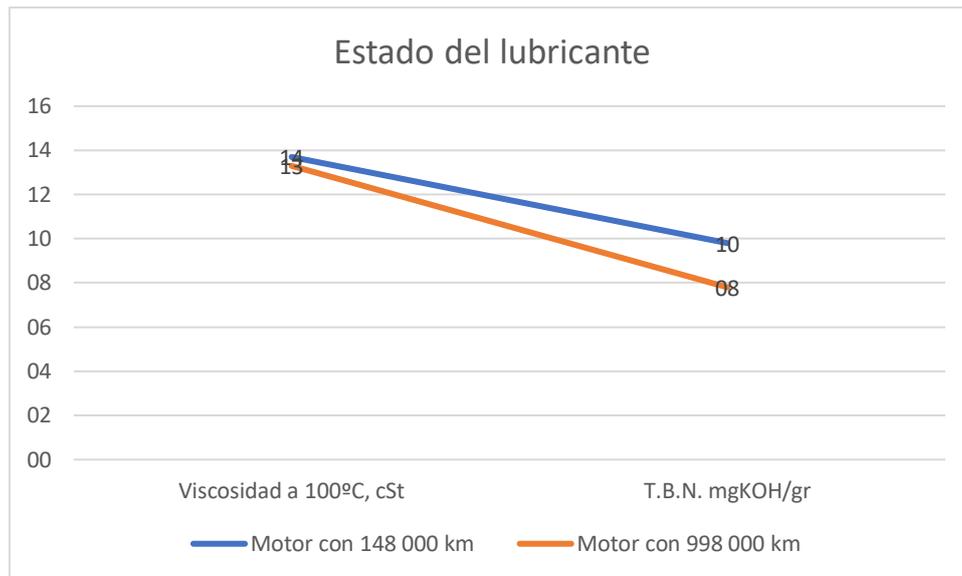
3.3 COMPARACIÓN DEL ESTADO DE LOS ACEITES.

El estado de los aceites está influenciado por la viscosidad y el índice TBN, los cuales ofrecen información crucial sobre las condiciones actuales del lubricante. La viscosidad refleja la capacidad del aceite para mantener su función lubricante en las piezas del motor incluso a elevadas temperaturas, mientras que el índice TBN está vinculado a la habilidad del aceite y sus aditivos para neutralizar los ácidos generados durante la combustión.

En la **Figura 36**, se presenta el estado de los lubricantes utilizados en este estudio. La curva azul representa el estado del aceite empleado en el motor con 148 000 kilómetros, mientras que la curva roja muestra el estado del aceite utilizado por en el motor con 998 000 kilómetros.

Figura 36

Estado de los aceites empleados en este estudio.



Al contrastar ambas gráficas, se evidencia que el lubricante empleado en el motor con 148,000 km, al ser seminuevo, exhibe un estado más óptimo. Esto se refleja en los valores superiores tanto de viscosidad como de TBN en comparación con el lubricante utilizado en el motor de mayor kilometraje, con 998 000 km. En este contexto, se puede concluir que el lubricante del seminuevo muestra una mayor resistencia a los efectos de los ácidos derivados de la combustión, proporcionando una lubricación más eficaz a las piezas internas del motor gracias a su mayor viscosidad. Aunque el otro motor de mayor recorrido presenta una viscosidad aceptable, asegurando una lubricación eficiente y evitando el desgaste y la contaminación del aceite, su bajo valor de TBN indica que el paquete de aditivos actúa eficazmente para prevenir la formación de ácidos, lodos y componentes indeseados.

3.4 COMPARACIÓN DEL DESGASTE DEL ACEITE Y DEL MOTOR ENTRE LOS DOS AUTOBUSES.

En esta sección, se llevará a cabo una comparación tanto de la contaminación y degradación del aceite como del desgaste experimentado por los motores evaluados en este estudio. Esto permitirá identificar cuál de los motores se encuentra en mejores condiciones y analizar la influencia de los lubricantes empleados en sus respectivos desgastes. Además, se evaluarán los aceites, considerando que al ser de marcas diferentes, su composición varía, afectando directamente este estudio. La composición base del aceite y sus aditivos son elementos cruciales para analizar el estado de salud del aceite y su impacto en la lubricación del motor, dependiendo de las condiciones a las que cada uno fue sometido. Dado que, como se mencionó anteriormente, el motor seminuevo, con 148 000 km opera en una geografía más exigente que el motor con mayor recorrido, 998 000 km. Esta sección del estudio presentará diversas gráficas comparativas, abordando la contaminación y el desgaste de las piezas de ambos motores.

3.4.1 COMPARACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS LUBRICANTES.

En esta sección, se llevará a cabo una comparación entre la cantidad de partículas presentes en cada aceite usado y los niveles permitidos para un funcionamiento óptimo del lubricante. El propósito es determinar cuál de los aceites está más contaminado y

analizar las posibles causas detrás de dicha contaminación. Al concluir, se identificará qué aceite exhibe menos contaminación, indicando un estado superior.

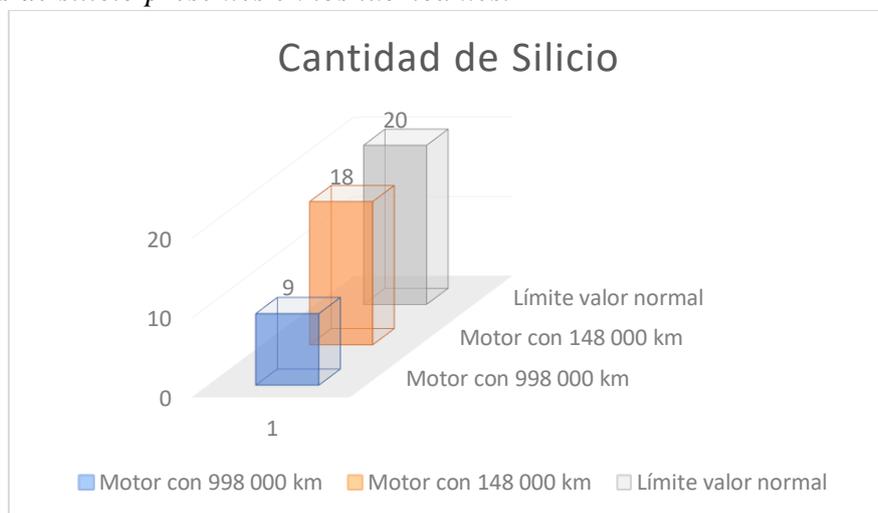
3.4.1.1 PRESENCIA DE SILICIO.

La presencia de partículas de silicio en la contaminación puede ser por la existencia de aditivos antiespumantes con un alto contenido de silicio en el lubricante. Como alternativa, podría estar asociada a la presencia de refrigerante, pero esta opción se descarta ya que el refrigerante contiene otros componentes como magnesio, boro y potasio, los cuales no se detectan en este análisis. En última instancia, la presencia de silicio en el lubricante estaría vinculada con la contaminación por polvo, lo que sugiere que un filtro de aire en mal estado podría ser la principal causa de la llegada de partículas al lubricante.

En la **Figura 37**, se observa la cantidad de partículas de silicio en cada lubricante, 9 ppm, equivalente al 45% del límite aceptable para un buen funcionamiento del lubricante, en el motor de mayor recorrido, representado por la barra azul. Mientras tanto, en el lubricante del motor seminuevo, representado por la barra roja, el silicio alcanza los 18 ppm, es decir, el 90% del límite. En resumen, el lubricante del motor seminuevo exhibe una mayor contaminación por partículas de silicio, 45% más. Esto se debe a que el mantenimiento preventivo de este motor se realizó después de superar en 600 km el funcionamiento permitido del lubricante, provocando la saturación del sistema de filtración de aire y permitiendo la entrada de polvo al motor.

Figura 37

Partículas de silicio presentes en los lubricantes.



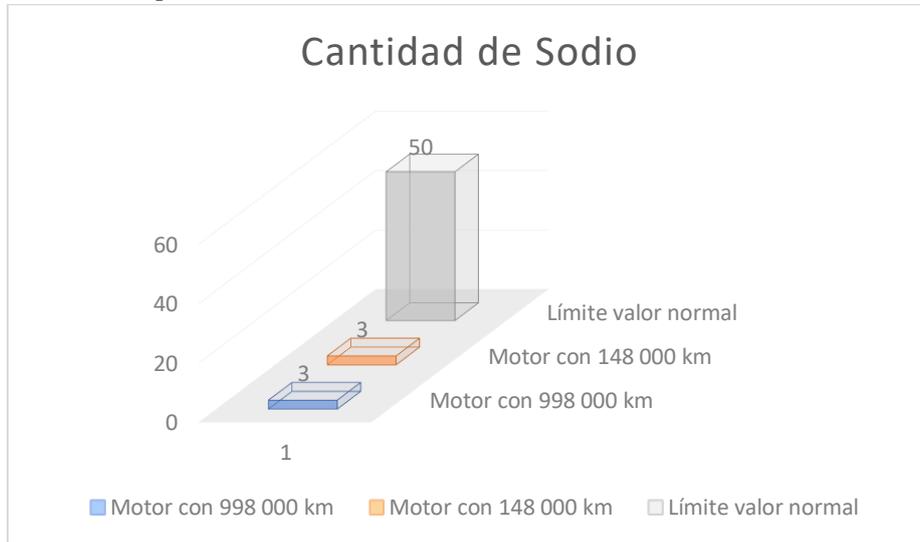
3.4.1.2 PRESENCIA DE SODIO.

La presencia de partículas de sodio en los lubricantes puede derivar de la presencia de refrigerante y combustible, así como de polvo. No obstante, los lubricantes contienen inherentemente cierta cantidad de este elemento. En este caso, la presencia de sodio se atribuiría a la composición de los lubricantes y a la presencia de polvo, ya que el sistema de filtración de aire pudo haberse saturado, en la **Tabla 20** y **Tabla 22** indican que no existe presencia de humedad en los aceites lo que descarta la contaminación por aceite o

combustible. En la **Figura 38**, se observa que ambos aceites exhiben 3 ppm de sodio, representando el 6% del límite aceptable para el correcto funcionamiento del lubricante.

Figura 38

Partículas de sodio presentes en los lubricantes.

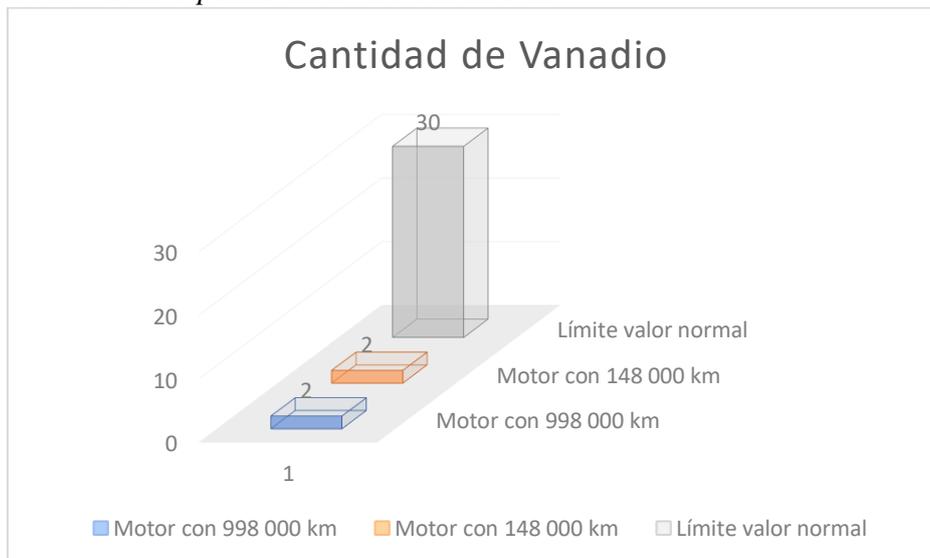


3.4.1.3 PRESENCIA DE VANADIO.

El vanadio es un componente del combustible, lo que sugiere que su presencia podría atribuirse a la contaminación de los lubricantes por diésel. Sin embargo, este elemento también está naturalmente presente en los paquetes de aditivos y en las bases de los lubricantes. En este caso, la presencia de vanadio se debería exclusivamente a la composición del aceite, ya que los resultados obtenidos en la **Tabla 20** y **Tabla 22** indican que los lubricantes carecen de humedad. Según la **Figura 39**, tanto el aceite del motor seminuevo como el del de mayor recorrido presentan solo 2 ppm de vanadio, equivalente al 6.67% del límite normal para un rendimiento óptimo de los lubricantes.

Figura 39

Partículas de vanadio presentes en los lubricantes.



3.4.1.4 PRESENCIA DE NÍQUEL.

El níquel puede estar presente en la composición intrínseca del lubricante o, como se señala en la **Tabla 14**, estas partículas pueden originarse por el desgaste de componentes tales como la guía de válvulas, el árbol de levas o el cigüeñal.

En la **Figura 40**, se aprecia que la cantidad permisible de partículas de níquel en el lubricante es de 10 ppm. Al comparar con la barra azul, que representa al motor con mayor kilometraje, se nota que este apenas contiene 1 ppm, representando el 10% del límite permitido. Por otro lado, el motor seminuevo no muestra presencia de níquel.

En el caso del motor con mayor kilometraje, la presencia de níquel podría atribuirse a la composición misma del aceite, ya que, al no ser un valor elevado, no se puede afirmar con certeza que la contaminación del lubricante se deba al desgaste de las piezas mencionadas anteriormente.

Figura 40

Partículas de níquel presentes en los lubricantes.



Basándose en este análisis, se puede afirmar que los lubricantes aún conservan condiciones aceptables para su funcionamiento, a pesar de que el motor seminuevo ha superado en 600 kilómetros el límite recomendado para su cambio, establecido en 10 000 kilómetros, y el motor con mayor recorrido en 170 kilómetros. Además, el laboratorio de la empresa "Lubrisa" ha diagnosticado que el lubricante se encuentra en un estado aceptable para seguir operando en el motor, respaldando esta evaluación, como se indica en la **Figura 41**.

Figura 41

Diagnóstico del aceite de los motores por parte de la empresa "Lubrisa".

| PARÁMETROS NORMALES |
|---|
| Lubricante en condiciones aceptables para seguir en uso. Se sugiere seguir con el monitoreo periódico de las condiciones del lubricante y del equipo. |

Se puede concluir que el aceite menos contaminado con respecto al silicio es el del motor con 998 000 km, ya que no superó significativamente su tiempo de funcionamiento en comparación con el límite recomendado en kilómetros. Además, al analizar los demás elementos contaminantes, ambos motores muestran el mismo porcentaje de contaminación, con la excepción del níquel, que está presente únicamente en el motor con mayor recorrido.

3.4.2 COMPARACIÓN DE DESGASTE DE LOS MOTORES.

Los elementos metálicos detectados en el aceite son consecuencia del desgaste de las piezas internas del motor. A través de esta comparación se va a determinar que motor sufre más desgaste. Aquí, las partículas que determinan el desgaste del motor son: Fe, Cr, Al, Cu, Pb y Sn, como lo indica la **Tabla 14**, que son materiales comunes en la fabricación de las piezas del motor.

3.4.2.1 PRESENCIA DE HIERRO.

La gran mayoría de los componentes del motor se fabrican a base de hierro, y su presencia se refleja en mayores cantidades en el aceite. Las piezas del motor hechas de hierro incluyen el bloque motor, las válvulas, la guía de válvulas, el árbol de levas, los pistones, las camisas, el cigüeñal y las bielas, según se detalla en la **Tabla 14**. Evaluar el desgaste de este elemento presenta desafíos, ya que implica analizar cada una de las piezas mencionadas y determinar si han sufrido deterioro. Sin embargo, es crucial centrarse en aquellas piezas que están en constante movimiento o experimentan rozamiento, ya que son más propensas al desgaste.

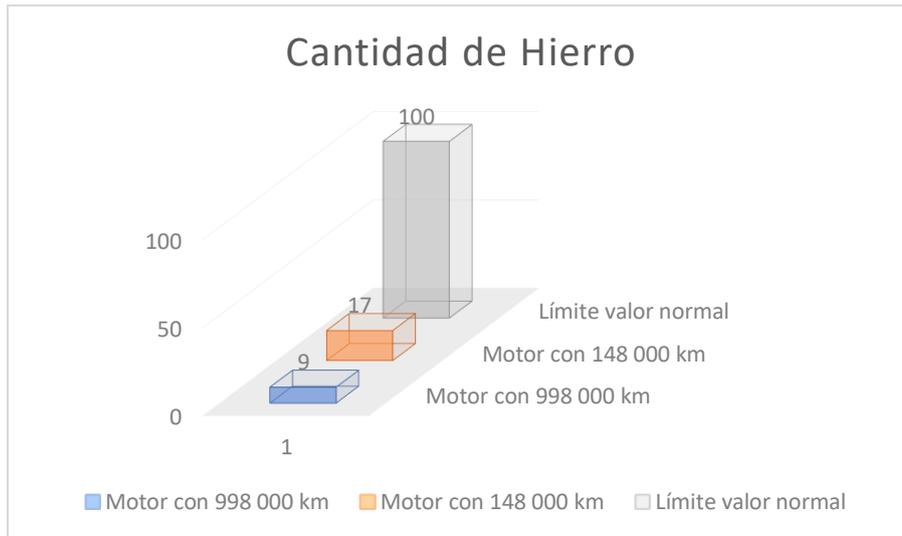
Dentro del motor, las válvulas, los pistones, las camisas y las bielas son las piezas más propensas a un desgaste significativo, ya que soportan mayores niveles de presión y calor durante el funcionamiento del motor. Por lo tanto, es de vital importancia priorizar el análisis de estas piezas.

En la **Figura 42**, se observa la cantidad de partículas de hierro presentes en cada motor. En el caso del motor con mayor recorrido, representado por la barra azul, se registran 9 ppm, lo que equivale al 9% del valor permitido. Por otro lado, en el motor seminuevo, la cantidad de hierro es casi el doble, alcanzando los 17 ppm, lo que representa el 17% del valor admisible. Sin embargo, estos valores son demasiado bajos para que puedan influir en una correcta lubricación, por lo que los motores se encuentran en buen estado aún.

Esto indica que el motor con 148 000 km de recorrido ha experimentado un mayor desgaste, a pesar de ser relativamente nuevo en comparación con el motor de 998 000 km. Este desgaste se atribuye a las exigencias climáticas y geográficas a las que está sometido, operando a altitudes de hasta aproximadamente 3 600 msnm en la ciudad de Mocha, lo que aumenta la carga de trabajo del motor y las condiciones de lubricación.

Figura 42

Partículas de hierro presentes en los lubricantes.



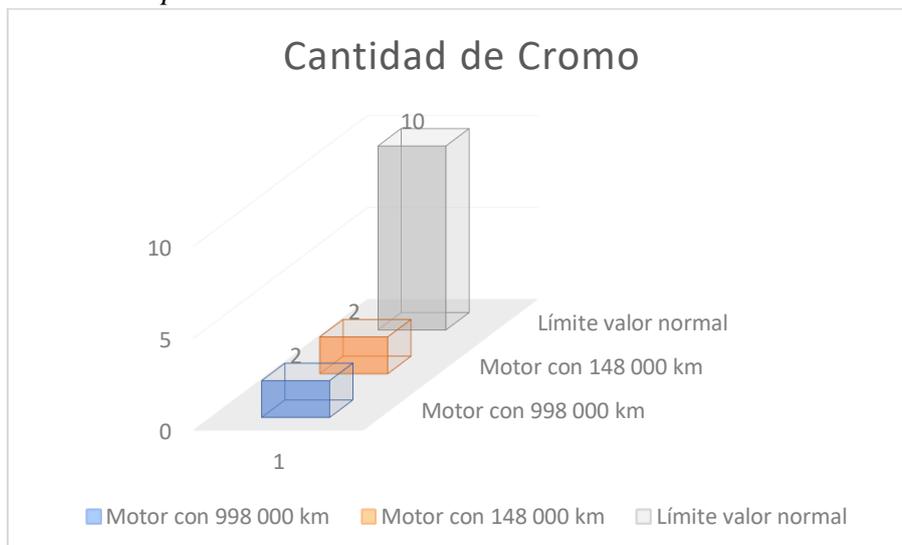
3.4.2.2 PRESENCIA DE CROMO.

El cromo presente en las piezas del motor diésel, como se detalla en la **Tabla 14**, se encuentra principalmente en las guías de válvulas y los anillos de pistón. El desgaste de estos componentes está primordialmente asociado a la fricción que experimentan en su funcionamiento. Por ejemplo, los anillos de pistón pueden entrar en contacto con las camisas cuando la lubricación no es óptima, y las guías de válvulas pueden rozarse con los vástagos de las válvulas.

La **Figura 43** muestra que tanto en el motor seminuevo como en el de mayor recorrido, se registra un contenido de 2 ppm de cromo debido al desgaste, lo que equivale al 20% del valor permitido para una lubricación adecuada. Sin embargo, esta cantidad de partículas de cromo no tiene un impacto significativo en el rendimiento ni en la lubricación del motor, dado que se encuentra muy por debajo de la cantidad aceptable para un funcionamiento normal.

Figura 43

Partículas de cromo presentes en los lubricantes.



3.4.2.3 PRESENCIA DE ALUMINIO.

La presencia de aluminio en el análisis del aceite usado podría relacionarse con el desgaste de los cojinetes de biela y bancada, así como el de los rodamientos. Como se detalla en la **Figura 44**, se observa que ambos motores muestran la misma cantidad de partículas de aluminio, con 4 ppm cada uno, lo que representa el 20% del límite del valor normal permitido para un funcionamiento óptimo.

Figura 44

Partículas de aluminio presentes en los lubricantes.



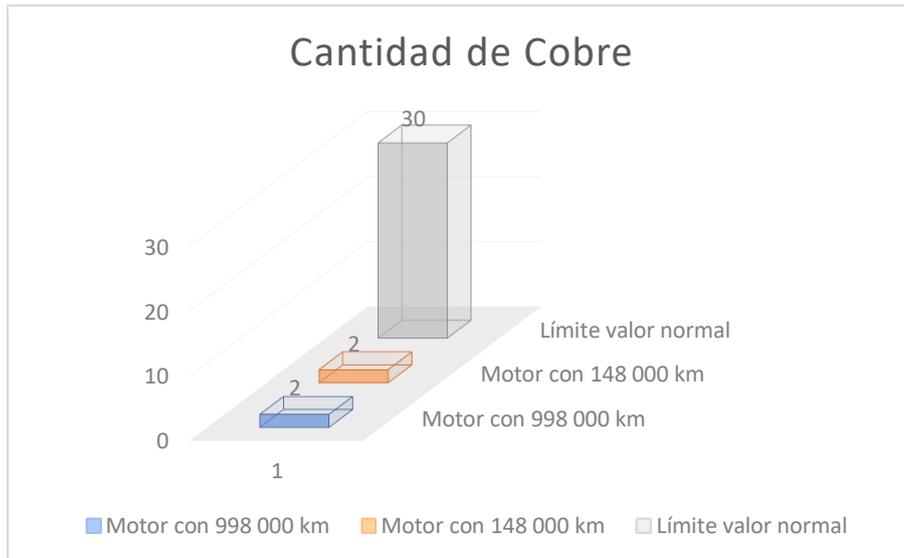
3.4.2.4 PRESENCIA DE COBRE.

Las partículas de cobre detectadas en el aceite pueden originarse por el desgaste de las guías de válvulas y/o los cojinetes de biela y bancada. Como se muestra en la **Figura 45**, ambos motores revelaron una concentración de 2 ppm de partículas de cobre en el análisis del aceite, lo que representa el 6.67% del límite permitido para una adecuada lubricación del motor.

Aunque se identifica la presencia de cobre en el aceite, su cantidad es relativamente baja y no tiene un impacto significativo en el funcionamiento ni en la lubricación del motor. No obstante, es importante mantener un seguimiento de estas piezas mencionadas anteriormente para controlar cualquier posible desgaste. Se recomienda una supervisión continua para garantizar un rendimiento óptimo del motor.

Figura 45

Partículas de cobre presentes en los lubricantes.



3.4.2.5 PRESENCIA DE PLOMO.

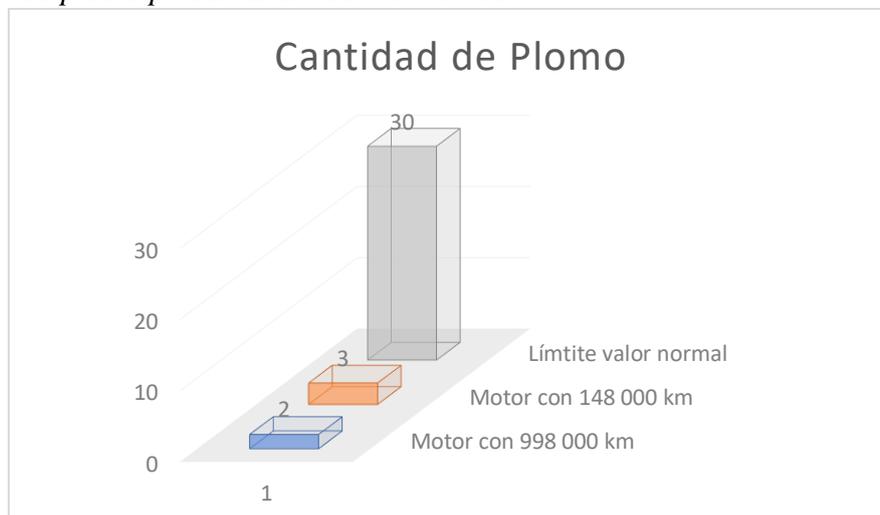
Dentro del motor diésel, los cojinetes de biela suelen ser fabricados con plomo. El límite de presencia de partículas en el lubricante es de 30 ppm. Como se puede apreciar en la **Figura 46**, el motor con 148 000 km de recorrido presenta una mayor concentración de plomo, con 3 ppm, lo que equivale al 10% del límite permitido. Por otro lado, el motor con 998 000 km registra 2 ppm, equivalente al 6.67% del valor estándar de presencia de plomo.

Estos resultados confirman que las exigencias a las que se somete el motor seminuevo son considerablemente más altas que las del motor con mayor recorrido, lo que se refleja en la mayor presencia de plomo en los análisis.

El motor seminuevo opera a altitudes superiores a los 2 800 metros sobre el nivel del mar durante períodos prolongados, lo que resulta en un funcionamiento bajo una carga mayor. Esto afecta directamente las presiones internas del motor durante la combustión, lo que podría provocar desgaste en los cojinetes de las bielas. Además, las condiciones de lubricación y la calidad del aceite también pueden contribuir al desgaste.

Figura 46

Partículas de plomo presentes en los lubricantes.



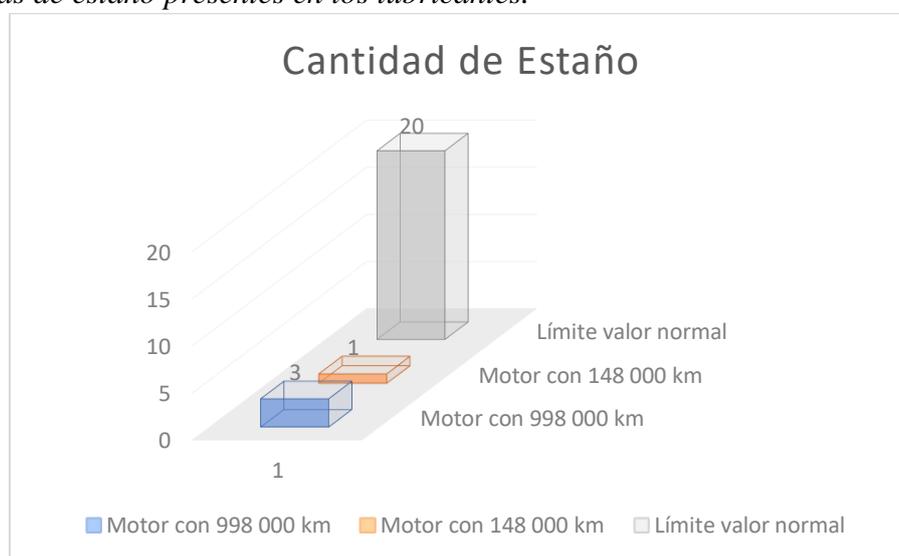
3.4.2.6 PRESENCIA DE ESTAÑO.

El estaño es otro material utilizado en la fabricación de cojinetes de biela. En este caso, en el análisis del motor con mayor recorrido se detectó la presencia de estas partículas, lo que sugiere que los cojinetes están fabricados con estaño y muestran un desgaste ligero, según lo indica la **Figura 47**. En comparación con el valor aceptable de estas partículas en el lubricante, este motor muestra una disminución del 85% en su concentración, lo que indica que no hay una contaminación excesiva que pueda comprometer el funcionamiento y rendimiento del motor.

Por otro lado, el motor seminuevo presenta solo el 5% de las partículas presentes, lo que indica que los cojinetes en este motor tienen una menor concentración de estaño y que su desgaste no es significativo.

Figura 47

Partículas de estaño presentes en los lubricantes.



La presenta un resumen de la cantidad de partículas presentes en cada motor, junto con las partes del motor que podrían estar fabricadas con estos elementos, explicando su presencia en el aceite y el valor aceptable de partículas antes de considerarse una presencia de partículas anormal.

Tabla 24, presenta un resumen de la cantidad de partículas presentes en cada motor, junto con las partes del motor que podrían estar fabricadas con estos elementos, explicando su presencia en el aceite y el valor aceptable de partículas antes de considerarse una presencia de partículas anormal.

Tabla 24

Resumen de la cantidad de partículas presentes en cada lubricante.

| Partículas presentes | Valor normal de partículas | Partículas motor 148 000 km | Partículas motor 998 000 km | Piezas del motor |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Hierro (Fe) | 100 | 17 (17%) | 9 (9%) | Válvulas, guía de válvulas, árbol de levas, pistones, camisas, cigüeñal, bielas |

| | | | | |
|----------------------------------|----|--------------|--------------|--|
| Cromo (Cr) | 10 | 2 (20%) | 2 (20%) | Cojinetes de biela y bancada, Guía de válvulas |
| Aluminio (Al) | 20 | 4 (20%) | 4 (20%) | Cojinetes de biela y bancada, rodamientos |
| Cobre (Cu) | 30 | 2 (6.67%) | 2 (6.67%) | Guía de válvulas, cojinetes de biela y bancada |
| Plomo (Pb) | 30 | 3 (10%) | 2 (6.67%) | Cojinetes de biela |
| Estaño (Sn) | 20 | 1 (5%) | 3 (15%) | Cojinetes de biela |
| Media de contaminación(%) | | 13.11 | 12.89 | |

En términos generales, estos motores muestran un desgaste insignificante en sus componentes. Al comparar las partículas presentes en el lubricante con el límite permisible y calcular un promedio de la contaminación, se observa que ambos motores se sitúan por debajo del 15%, lo que indica un buen estado de las piezas y una adecuada lubricación.

Considerando el kilometraje, es interesante notar que el motor con mayor recorrido, a pesar de sus 998 000 km, presenta un estado ligeramente mejor. Su porcentaje de contaminación es un 0.22% menor que el del motor con 148 000 km. Este fenómeno puede atribuirse a diversos factores, incluyendo la regularidad y calidad del mantenimiento preventivo realizado en los motores, la calidad del lubricante utilizado y las condiciones de operación a las que están sujetos.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1 CONCLUSIONES.

La elección de dos motores idénticos, pero con recorridos y condiciones operativas distintas, tiene como objetivo evaluar tanto la degradación de los motores como la del aceite, además de analizar la contaminación del lubricante. La geografía a lo largo de la cual trabajan estos autobuses ejerce una influencia significativa en las condiciones de funcionamiento de los motores. Por un lado, el motor con 148 000 km, el cual lleva en funcionamiento poco más de un año opera a altitudes de hasta aproximadamente 3 600 metros sobre el nivel del mar, mientras que el motor con 998 000 km, que lleva operando aproximadamente 9 años, trabaja hasta una altitud de 2 800 metros sobre el nivel del mar. Esta diferencia de 800 metros en altura tiene un impacto considerable en el rendimiento del motor, las demandas operativas difieren, lo que resulta en un mayor desgaste y variación en la lubricación de los motores, dependiendo de las necesidades específicas de cada uno.

Las dos propiedades fundamentales para evaluar la degradación del aceite y su capacidad para prolongar su vida útil son la viscosidad y el índice TBN. La viscosidad desempeña un papel esencial en la lubricación adecuada de las piezas, y una viscosidad elevada puede resultar en un aumento de la temperatura del motor, provocando la oxidación del aceite y un mayor consumo de energía, afectando negativamente el rendimiento del motor.

El límite establecido para la viscosidad del aceite usado es de 12.3 cSt, indicando precaución respecto al estado de salud del lubricante. El motor con 148 000 km supera este límite en 1.4 cSt, mientras que el aceite usado del motor con 998 000 km lo excede en 1.0 cSt. Esto sugiere que ambos aceites aún pueden cumplir eficazmente sus funciones de lubricación en los componentes del motor, y que el aceite del motor seminuevo presenta un estado de salud superior al mostrar una viscosidad más elevada.

Por otro lado, el índice TBN guarda una relación directa con el paquete de aditivos contenido en los lubricantes, ya que estos desempeñan un papel crucial durante la combustión al prevenir la formación de ácidos. Un valor bajo de TBN podría indicar un adecuado funcionamiento de los aditivos al proteger el aceite y garantizar una lubricación eficaz de las piezas.

El límite de precaución establecido para el índice TBN en el aceite usado es de 5.0. El motor con 148 000 km supera este límite en 4.8 puntos, mientras que el motor con 998 000 km lo excede en 2.8 puntos. En conclusión, se infiere que el aceite del motor seminuevo se encuentra en mejores condiciones y que ambos aceites aún poseen la capacidad de prevenir la formación de ácidos, lo que sugiere que el intervalo de cambio puede extenderse.

En ambos motores, tanto en el motor con 148 000 km como en el de 998 000 km, se identificó que el elemento contaminante preponderante fue el hierro (Fe). Esta presencia de hierro puede indicar desgaste en diversas piezas, entre las que se incluyen el bloque motor, válvulas, guía de válvulas, árbol de levas, pistones, camisas, cigüeñal y bielas. No obstante, a pesar de ser el motor con 148 000 km relativamente nuevo, se observa un mayor número de partículas de hierro, con un 8% más que el motor con 998 000 km. Esta disparidad podría atribuirse a las variadas condiciones operativas del motor, influenciadas

por la geografía por la que transita el autobús. Estas condiciones variables pueden ocasionar, en determinados momentos, un significativo aumento en la temperatura del motor, provocando la reducción de la película lubricante. Esta disminución facilita una mayor fricción entre las piezas del motor, contribuyendo al proceso de desgaste.

Asimismo, al examinar la contaminación del aceite en ambas unidades motrices, se observa que el silicio (Si) exhibe la concentración más elevada en partes por millón (ppm), alcanzando 18 ppm (90%) en el motor con 148 000 km y 9 ppm (45%) en el motor con 998 000 km. Este fenómeno puede originarse, en primer lugar, debido a la composición de los aditivos, ya que el silicio se emplea en aditivos antiespumantes que contribuyen a la resistencia degradativa del aceite. Por otro lado, la presencia de silicio podría derivar de partículas de polvo presentes en el motor, posiblemente debido a la saturación de los filtros de aire para estos motores.

En el motor seminuevo, se registra una cantidad superior de este elemento, con un aumento del 45% en comparación con el motor con mayor recorrido. Este incremento podría atribuirse al hecho de que este motor ha excedido en 600 kilómetros el intervalo para su mantenimiento preventivo, lo que posiblemente haya afectado el rendimiento de los filtros de aire, permitiendo el ingreso de partículas de polvo al motor.

Al analizar tanto la contaminación como el desgaste del motor, se puede concluir que el motor con mayor recorrido se encuentra en mejores condiciones. A pesar de haber alcanzado los 998 000 kilómetros, los resultados del análisis de aceite usado indican que presenta menores concentraciones de partículas contaminantes, tanto en silicio como en hierro, exhibiendo un 45% y 8% menos respectivamente en comparación con el motor de menor recorrido. Por otro lado, al evaluar la degradación del aceite, se observa que el motor con 148 000 kilómetros muestra una condición superior. Este motor presenta una mayor viscosidad y un índice TBN superior, con una diferencia de 0.4 cSt y 2 puntos respectivamente en comparación con el motor de mayor recorrido.

4.2 RECOMENDACIONES.

Es fundamental llevar a cabo una investigación preliminar sobre las piezas móviles del motor que están susceptibles a experimentar desgaste. Esto implica conocer los materiales de fabricación de estas piezas. Posteriormente, al realizar pruebas que determinen el desgaste y/o contaminación del lubricante, será posible identificar las piezas que requieren un seguimiento más cercano, con el objetivo de prevenir posibles fallas futuras en el motor.

Para lograr un análisis más preciso de los resultados, se sugiere obtener motores que empleen el mismo tipo de lubricante. Al compartir la misma composición, se facilitará una comparación más precisa del desgaste y la contaminación del aceite, permitiendo así llegar a conclusiones más certeras sobre el estado de los motores.

Es aconsejable llevar a cabo pruebas en los aceites sin utilizar, ya que esto proporciona un punto de referencia para contrastar de manera más efectiva los resultados obtenidos. Al conocer la cantidad de partículas presentes en cada elemento constituyente del aceite sin usar, se logrará una evaluación más precisa de la contaminación del aceite.

Siempre se debe procurar realizar las extracciones de las muestras de aceite de manera meticulosa para prevenir la contaminación del aceite con agentes externos. Se recomienda llevar a cabo una limpieza de las partes del motor cercanas al punto de extracción del aceite y esterilizar el kit de extracción antes de su uso.

Cuando se introduce la sonda para succionar el aceite, se aconseja que su longitud no alcance el fondo del cárter, ya que podría aspirar los sedimentos presentes en esa área. Por lo tanto, se recomienda ajustar la longitud de la sonda para que llegue ligeramente por debajo de la mitad del cárter, con el fin de evitar posibles resultados incorrectos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. Rao, C. Sheng, Z. Guo, and C. Yuan, “A review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 165. Academic Press, Feb. 15, 2022. doi: 10.1016/j.ymsp.2021.108385.
- [2] J. Liu, Y. Li, C. Zhang, and Z. Liu, “The effect of high altitude environment on diesel engine performance: Comparison of engine operations in Hangzhou, Kunming and Lhasa cities,” *Chemosphere*, vol. 309, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136621.
- [3] P. Breeze, “Chapter 5 - Diesel Engines,” in *Piston Engine-Based Power Plants*, P. Breeze, Ed., Academic Press, 2018, pp. 47–57. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812904-3.00005-7>.
- [4] C. J. Fernández Pilataxi and R. L. Meneses Huera, “Modelado y análisis computacional del conjunto móvil de un motor de combustión interna alimentado con diésel y biodiésel,” *Ingeniería en Mantenimiento Automotriz*, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2020. Accessed: Nov. 06, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10906>
- [5] Z. Liu, Z. Guo, X. Rao, Y. Xu, C. Sheng, and C. Yuan, “A comprehensive review on the material performance affected by gaseous alternative fuels in internal combustion engines,” *Eng Fail Anal*, vol. 139, p. 106507, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106507>.
- [6] Z. Yao, K. Hu, and R. Li, “Enhanced high-temperature thermal fatigue property of aluminum alloy piston with Nano PYSZ thermal barrier coatings,” *J Alloys Compd*, vol. 790, pp. 466–479, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.177>.
- [7] L. L. Myagkov, K. Mahkamov, N. D. Chainov, and I. Makhkamova, “11 - Advanced and conventional internal combustion engine materials,” in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, R. Folkson, Ed., Woodhead Publishing, 2014, pp. 370–408e. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857097422.2.370>.
- [8] V. D’Agostino and A. Senatore, “10 - Fundamentals of lubrication and friction of piston ring contact,” in *Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain*, H. Rahnejat, Ed., Woodhead Publishing, 2010, pp. 343–386. doi: <https://doi.org/10.1533/9781845699932.2.343>.
- [9] H. Yamagata, “4 - The piston ring,” in *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*, H. Yamagata, Ed., Woodhead Publishing, 2005, pp. 87–109. doi: <https://doi.org/10.1533/9781845690854.87>.

- [10] L. Witek and P. Zelek, "Stress and failure analysis of the connecting rod of diesel engine," *Eng Fail Anal*, vol. 97, pp. 374–382, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.004>.
- [11] H. Yamagata, "9 - The connecting rod," in *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*, H. Yamagata, Ed., Woodhead Publishing, 2005, pp. 207–227. doi: <https://doi.org/10.1533/9781845690854.207>.
- [12] K. Aliakbari, R. Masoudi Nejad, T. Akbarpour Mamaghani, P. Pouryamout, and H. Rahimi Asiabaraki, "Failure analysis of ductile iron crankshaft in compact pickup truck diesel engine," *Structures*, vol. 36, pp. 482–492, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.034>.
- [13] J. Langari, K. Aliakbari, R. Masoudi Nejad, and S. Kamel Abbasnia, "Failure analysis of CK45 steel crankshaft in light truck diesel engine," *Eng Fail Anal*, vol. 145, p. 107045, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.107045>.
- [14] J. Zhao, Y. Li, L. Xie, and J. Liu, "Lubrication failure analysis of camshaft bearings in V6 diesel engine," *Eng Fail Anal*, vol. 150, p. 107329, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107329>.
- [15] A. Patra, A. Mahapatra, D. K. Bagal, A. Barua, S. Jeet, and D. Patnaik, "Comparative evaluation of 4-cylinder CI engine camshaft based on FEA using different composition of metal matrix composite," *Mater Today Proc*, vol. 50, pp. 692–699, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.477>.
- [16] F. J. Cavalieri, F. Zenklusen, and A. Cardona, "Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests," *Mech Mach Theory*, vol. 104, pp. 81–99, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.017>.
- [17] L. F. Garcia Rocha, "Desarrollo de una herramienta didáctica para el análisis de ciclos termodinámicos ideales," Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, 2019. Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/63205681/Tesis20200505-21224-m2fhi4.pdf>
- [18] J. E. Johnson and J. D. Naber, "9 - Internal combustion engine cycles and concepts**Jaclyn E. Johnson and Jeffrey D. Naber are the authors from the previous edition as well.," in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance (Second Edition)*, R. Folkson and S. Sapsford, Eds., Woodhead Publishing, 2022, pp. 233–261. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90979-2.00003-2>.
- [19] A. Tolley, "10 - Heavy-duty vehicles and powertrains: technologies and systems that enable 'zero' air quality and greenhouse gas emissions with enhanced levels of efficiency**Q. Xin and C. F. Pinzon are the original authors of the previous edition and not contributing to this edition.," in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance (Second Edition)*,

- R. Folkson and S. Sapsford, Eds., Woodhead Publishing, 2022, pp. 263–289. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90979-2.00014-7>.
- [20] B. Nole, “DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS INTERACTIVOS DEL CICLO DE POTENCIA OTTO,” Quito, Aug. 2022. Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23188>
- [21] A. K. Azad, P. Halder, K. Nanthagopal, and B. Ashok, “Chapter 13 - Investigation of diesel engine in cylinder flow phenomena using CFD cold flow simulation,” in *Advanced Biofuels*, A. K. Azad and M. Rasul, Eds., in Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, 2019, pp. 329–336. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102791-2.00013-1>.
- [22] Y.-H. Kiang, “Chapter 9 - Combustion fundamentals and energy systems,” in *Fuel Property Estimation and Combustion Process Characterization*, Y.-H. Kiang, Ed., Academic Press, 2018, pp. 313–362. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813473-3.00009-X>.
- [23] H. Yaqoob, Y. H. Teoh, M. A. Jamil, and F. Sher, “Energy, exergy, thermoeconomic and sustainability assessment of tire pyrolysis oil in common rail direct injection diesel engine,” 2021, doi: [10.1016/j.fuel.2021.122622](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122622).
- [24] T. Okawa *et al.*, “3 - Fundamentals for power engineering,” in *Fundamentals of Thermal and Nuclear Power Generation*, vol. 1, Y. Koizumi, T. Okawa, and S. Mori, Eds., Elsevier, 2021, pp. 77–226. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820733-8.00003-0>.
- [25] D. P. Nolan, “Chapter 4 - Physical Properties of Hydrocarbons and Petrochemicals,” in *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities (Fourth Edition)*, D. P. Nolan, Ed., Gulf Professional Publishing, 2019, pp. 65–88. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816002-2.00004-0>.
- [26] J. W. G. Turner and F. C. P. Leach, “2 - The role of alternative and renewable liquid fuels in environmentally sustainable transport*,” in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance (Second Edition)*, R. Folkson and S. Sapsford, Eds., Woodhead Publishing, 2022, pp. 19–56. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90979-2.00019-6>.
- [27] W. Rothengatter, “Economic Valuation of Health Impacts in Cost-Benefit Analyses of Transport Infrastructure Projects in Europe,” in *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*, J. Nriagu, Ed., Oxford: Elsevier, 2019, pp. 231–240. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10650-5>.
- [28] Y. Zheng, “Estudio Comparativo de las Emisiones Procedentes de Autobús en Ciclo Real,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2019.
- [29] D. A. Betancourt Pineda and D. F. Flores Jaramillo, “DIAGNÓSTICO DEL ACEITE USADO DE MOTOR DE LA EMPRESA DE TRANSPORTE

URBANO LANCOMTRI S.A.,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, Cuenca, 2018.

- [30] J. Castelló Villanueva, “Evaluación de tres formulaciones diferentes de aceites lubricantes y su impacto en el mantenimiento de una flota de autobuses,” May 2021, Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/166356>
- [31] K. Howard, “7 - Advanced engine oils*,” in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance (Second Edition)*, R. Folkson and S. Sapsford, Eds., Woodhead Publishing, 2022, pp. 173–195. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90979-2.00006-8>.
- [32] J. E. Pastillo Males, S. A. Otero Potosí, and Yaselga Edison, “Utilidad y propiedades físico-químicas de los lubricantes sintéticos para uso automotriz,” *Polo del Conocimiento*, vol. 7, pp. 898–910, Nov. 2022, doi: 10.23857/pc.v7i8.
- [33] M. Ortiz-Alvarez and R. Piloto-Rodríguez, “ACEITES LUBRICANTES USADOS, UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA,” 2019.
- [34] J. D. Hernández Pedraza and Maldonado Rodríguez Andrés Felipe, “EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA RECUPERACIÓN DE BASES LUBRICANTES CONTENIDAS EN LOS ACEITES LUBRICANTES INDUSTRIALES USADOS,” Programa de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá, 2020.
- [35] I. Ecuatoriano de Normalización, “INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2030:2011,” 2011.
- [36] D. G. Gutiérrez Espinoza, “Análisis de la influencia de los aditivos mejoradores del índice de viscosidad sobre las emisiones contaminantes y torque de un motor de combustión interna alternativo,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2022. Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23185/1/UPS-CT010042.pdf>
- [37] K. S. Tenesaca Chicaiza and K. A. Vargas Uguña, “Análisis de la influencia del tipo de bujías sobre la degradación del aceite,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, Cuenca, 2023.
- [38] C. S. Hsu and P. R. Robinson, “Lubricant Processes and Synthetic Lubricants,” in *Petroleum Science and Technology*, Springer International Publishing, 2019, pp. 253–285. doi: 10.1007/978-3-030-16275-7_13.
- [39] J. E. P. Males, S. A. O. Potosí, and E. Yaselga, “Utilidad y propiedades físico-químicas de los lubricantes sintéticos para uso automotriz,” *Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 11, pp. 898–910, 2022.
- [40] H. Raposo, J. T. Farinha, I. Fonseca, and L. A. Ferreira, “Condition monitoring with prediction based on diesel engine oil analysis: A case study for urban buses,” *Actuators*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.3390/act8010014.

- [41] C. N. Muñoz and J. R. Marín, “Aplicaciones del análisis de aceite usado en motores a diésel de uso marino,” Mar. 2009.
- [42] G. E. Newell, “Oil analysis cost-effective machine condition monitoring technique,” *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 51, no. 3, pp. 119–124, 1999, doi: 10.1108/00368799910268066.
- [43] M. Moran Velásquez, “Influencia del índice de viscosidad del lubricante en el nivel de desgaste de las piezas del motor de combustión interna y en la contaminación atmosférica,” 2022.
- [44] M. TOLEDO, “Valoradores y tituladores,” Valoradores, tituladores automáticos y softwares | METTLER TOLEDO. Accessed: Dec. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/Product_Family_Browse_titrators_main.html
- [45] N. Lakal, A. H. Shehri, K. W. Brashler, S. P. Wankhede, J. Morse, and X. Du, “Sensing technologies for condition monitoring of oil pump in harsh environment,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 346, p. 113864, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113864>.
- [46] X. Zhu, C. Zhong, and J. Zhe, “Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring – A review,” *Tribol Int*, vol. 109, pp. 473–484, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.015>.
- [47] J. Xu and L. Xu, “Chapter Eight - Maintenance Decision Support,” in *Integrated System Health Management*, J. Xu and L. Xu, Eds., Academic Press, 2017, pp. 377–432. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812207-5.00008-0>.
- [48] R. Kent, “Chapter 6 - Operations,” in *Energy Management in Plastics Processing (Third Edition)*, R. Kent, Ed., Elsevier, 2018, pp. 319–344. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102507-9.50006-4>.
- [49] H. P. Bloch, “Subject Category 18 - Maintenance,” in *Petrochemical Machinery Insights*, H. P. Bloch, Ed., Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 191–222. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809272-9.00018-9>.
- [50] J. F. Silva Pilamunga, “Propuesta para la implementación de buses de dos pisos para la flota vehicular de la Cooperativa Chimborazo de la ciudad de Riobamba,” 2022.
- [51] W. A. Allauca and A. I. Carillo, “ESTUDIO DEL LUBRICANTE PARA MOTORES DIÉSEL 6 CILINDROS EN LÍNEA TURBOALIMENTADOS BASADO EN ANÁLISIS DEL ACEITE EN DIFERENTES CONDICIONES GEOGRÁFICAS,” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2021.
- [52] J. F. Antamba, “DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN OPERATIVA DEL MOTOR POR ENCENDIDO PROVOCADO (MEP), SEGÚN EL TIPO DE GASOLINA EMPLEANDO EN LAS CIUDADES DE QUITO Y ESMERALDAS,” Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.

- [53] D. A. Gutiérrez Mora and J. V. Pérez Bejarano, “EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO PARA LA DISMINUCIÓN DE AZUFRE Y METALES PESADOS EN ACEITES LUBRICANTES USADOS DE MOTOR DIÉSEL, COMO POSIBLE ALTERNATIVA PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ,” Fundación Universidad de América, Bogotá, 2019. Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7382>
- [54] H. R. Guamán and O. M. Ávila, “ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN Y VIDA ÚTIL DEL LUBRICANTE MOTOR, EN UN VEHÍCULO MODELO ACTROSS 3353S MEDIANTE ENSAYOS DE VISCOSIDAD Y TBN,” Cuenca, Apr. 2020.
- [55] R. Widman, “Boletín 46 - Interpretando el Reporte de Análisis de Aceite,” Widman International SLR. Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.widman.biz/boletines/46.php>
- [56] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D445, “Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation Of Dynamic Viscosity),” West Conshohocken, 2011.
- [57] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E2412, “Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry,” West Conshohocken, 2018.
- [58] “ERASPEC OIL - Portable FTIR Oil Analysis in Seconds”. eralytics. Accedido el 14 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://eralytics.com/instruments/oil-condition-monitoring/eraspec-oil-used-oil-analysis/>
- [59] “SpectrOil 100 Series - RDE-OES Elemental Analyzer”. Spectro Scientific - Confidence in knowing. Accedido el 14 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.spectrosci.com/product/spectroil-100-series---rde-oes-elemental-analyzer>

ANEXOS

ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS DE ACEITES



CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

| | | |
|-------------------------------|--------------|--------------------------|
| Densité à 15°C | DIN 51757 | 879 kg/m ³ |
| Grade SAE | SAE J300 | 15W-40 |
| Viscosité cinématique à 40°C | DIN 51562-1 | 114.9 mm ² /s |
| Viscosité cinématique à 100°C | DIN 51562-1 | 14.9 mm ² /s |
| Indice de viscosité | DIN ISO 2909 | 135 |
| Viscosité HTHS | CEC L-036-09 | ≥ 3.5 mPa.s |
| Point d'écoulement | DIN ISO 3016 | -33 °C |
| Cendres sulfatées | ASTM D874 | ≤ 2.0 %m/m |
| Colorant | DIN 10964 | Aucun |



Revisión: 2018-2 Página 1 de 1

HOJA DE DATOS TÉCNICOS DIVISIÓN AUTOMOTRÍZ Aceite para Motores a Diésel

| | MÉTODO ASTM D | VALORES TÍPICOS |
|--|-----------------|-----------------|
| Grado SAE | SAE J300 | 15W-40 |
| Apariencia a Temperatura Ambiente | Visual | Brillante |
| Color ASTM | 1500 | L4.5 |
| Viscosidad Cinemática @ 100 °C, mm ² /s (cSt) | 445 | 15.00 |
| Viscosidad Cinemática @ 40 °C, mm ² /s (cSt) | 445 | 109.9 |
| Índice de Viscosidad | 2270 | 142 |
| Viscosidad Aparente (C.C.S.) @ -20 °C, mPa*s (cP) | 5293 | 6 100 |
| Densidad @ 15.6 °C, kg/L | 1298 | 0.8748 |
| Punto de Inflamación, °C | 92 | 242 |
| Punto de Ecurrimiento, °C | 97 | -36 |
| Número de Base (BN), mg KOH/g | 2896 | 11.90 |

ANEXO 2: TABLAS DE RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE ACEITES.

Flota Imbabura

| REPORTE DE ANÁLISIS DE LUBRICANTE | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|----------------|----------------|--|---|--|--|--|
|  | NOMBRE DEL CLIENTE: | | Compartimento: | MOTOR | | Diagnóstico de la última muestra: | | | |
| | UNIVERSIDAD DEL NORTE | | Equipo: | FLOTA IMBABURA | | PARAMETROS NORMALES | | | |
| | | | Marca: | SCANIA | | Lubricante en condiciones aceptables para seguir en uso. Se sugiere seguir con el monitoreo periódico de las condiciones del lubricante y del equipo. | | | |
| | | | Serie: | | | | | | |
| | | | Modelo: | 460 | | | | | |
| | | | Lubricante: | 15W40 | | | | | |
| | | Marca del Lubricante: | ROSHFRINS | | | | | | |
| INFORMACIÓN DE LA MUESTRA | | | | | | | | | |
| Numeración de Muestra | 12-23-G-19238 | | | | | | | | |
| Fecha de Muestreo | 2023-11-22 | | | | | | | | |
| Fecha de Ingreso | 2023-12-12 | | | | | | | | |
| Fecha de Informe | 2023-12-13 | | | | | | | | |
| Equipo Hrs/ Km | 148000 | | | | | | | | |
| Aceite Hrs/ Km | 10600 | | | | | | | | |
| Condición | NORMAL | | | | | | | | |
| ESTADO DEL LUBRICANTE | | | | | | | | | |
| Viscosidad a 100°C, cSt | 13.7 | | | | | | | | |
| T.B.N. mgKOH/gr | 9.8 | | | | | | | | |
| Humedad | NEGATIVO | | | | | | | | |
| CONTAMINACIÓN DEL LUBRICANTE - PPM (mg/kg) | | | | | | | | | |
| Si (Silicio) | 18 | | | | | | | | |
| Na (Sodio) | 3 | | | | | | | | |
| Vanadio (V) | 2 | | | | | | | | |
| Ni (Niquel) | 0 | | | | | | | | |
| DESGATE DEL EQUIPO - PPM (mg/kg) | | | | | | | | | |
| Fe (Hierro) | 17 | | | | | | | | |
| Cr (Cromo) | 2 | | | | | | | | |
| Al (Aluminio) | 4 | | | | | | | | |
| Cu (Cobre) | 2 | | | | | | | | |
| Pb (Plomo) | 3 | | | | | | | | |
| Estaño (Sn) | 1 | | | | | | | | |

Transportes Ecuador

| REPORTE DE ANÁLISIS DE LUBRICANTE | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|--|-----------------------|--------------------|--|---|--|--|--|
|  | NOMBRE DEL CLIENTE: | | Compartimento: | MOTOR | | Diagnóstico de la última muestra: | | | |
| | UNIVERSIDAD DEL NORTE | | Equipo: | TRANSPORTE ECUADOR | | PARAMETROS NORMALES | | | |
| | | | Marca: | SCANIA | | Lubricante en condiciones aceptables para seguir en uso. Se sugiere seguir con el monitoreo periódico de las condiciones del lubricante y del equipo. | | | |
| | | | Serie: | | | | | | |
| | | | Modelo: | 460 | | | | | |
| | | | Lubricante: | 15W40 | | | | | |
| | | | Marca del Lubricante: | FUCHS | | | | | |
| INFORMACIÓN DE LA MUESTRA | | | | | | | | | |
| Numeración de Muestra | 12-23-G-19239 | | | | | | | | |
| Fecha de Muestreo | 2023-12-06 | | | | | | | | |
| Fecha de Ingreso | 2023-12-12 | | | | | | | | |
| Fecha de Informe | 2023-12-13 | | | | | | | | |
| Equipo Hrs/ Km | 998010 | | | | | | | | |
| Aceite Hrs/ Km | 10170 | | | | | | | | |
| Condición | NORMAL | | | | | | | | |
| ESTADO DEL LUBRICANTE | | | | | | | | | |
| Viscosidad a 100°C, cSt | 13.3 | | | | | | | | |
| T.B.N. mgKOH/gr | 7.8 | | | | | | | | |
| Humedad | NEGATIVO | | | | | | | | |
| CONTAMINACIÓN DEL LUBRICANTE - PPM (mg/kg) | | | | | | | | | |
| Si (Silicio) | 9 | | | | | | | | |
| Na (Sodio) | 3 | | | | | | | | |
| Vanadio (V) | 2 | | | | | | | | |
| Ni (Niquel) | 1 | | | | | | | | |
| DESGATE DEL EQUIPO - PPM (mg/kg) | | | | | | | | | |
| Fe (Hierro) | 9 | | | | | | | | |
| Cr (Cromo) | 2 | | | | | | | | |
| Al (Aluminio) | 4 | | | | | | | | |
| Cu (Cobre) | 2 | | | | | | | | |
| Pb (Plomo) | 2 | | | | | | | | |
| Estaño (Sn) | 3 | | | | | | | | |

ANEXO 3: FOTOGRAFÍAS TOMADAS DURANTE LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.



